

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Porovnání odchylek a materiálové vlastnosti 3D tisku

Comparison of Deviations and Material
Properties of 3D Printing

Autor práce:

Jakub Olejník

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Hajnyš, Ph.D.

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Olejník**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Porovnání odchylek a materiálové vlastnosti 3D tisku**
Comparison of Deviations and Material Properties of 3D Printing
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor problematiky.
3. Experimentální návrh řešení problematiky.
4. Kvalitativní zhodnocení řešeného návrhu.
5. Diskuze a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


GIBSON, I, D ROSEN a B STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010, XXII, 459 p. ISBN 1441911200.
SRIVATSAN, T.S., SUDARSHAN, T. S., *Additive Manufacturing: Innovations, Advances and Applications*. CRC Press. ISBN: 978-1-4987-1477-8.
TIANLIN, Z.; KETAI, H.; HUAIXUE, L.; LECHANG, Y. Mechanical properties of lightweight 316L stainless steel lattice structures fabricated by selective laser melting, *Materials & Design*, Volume 181, 2019
Internetové zdroje www.3d-tisk.cz, www.3dhubs.com, <http://www.thingiverse.com>, aj.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Hajnýš, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty




Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil interní údaje o technických parametrech získaných od firmy SIEMENS, Mohelnice, firma s jejich zveřejněním souhlasí.

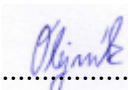
V Ostravě dne: 18.5.2020


.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne: 18.5.2020


.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Jakub Olejník

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Za Penzionem 305/10, 789 85 Mohelnice

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

OLEJNÍK, J. *Porovnání odchylek a materiálové vlastnosti 3D tisku: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2019, 61 s. Vedoucí práce: Hajnýš, J.

Tato bakalářská práce se zabývá porovnáním odchylek a materiálovými vlastnostmi 3D tisku. Je rozdělena na dvě části – teoretickou a experimentální. V teoretické části jsou shrnuty základní principy a přehled metod 3D tisku. Dále jsou zde také shrnuty materiály a jejich vlastnosti, které jsou používány k samotnému tisku. Experimentální část se zabývá hodnocením výtisků zhotovených na 3D tiskárně HP Jet Fusion 540 a následným porovnáním s konvenčním obráběním. V této práci jsou navrženy a vytištěny zkušební výtisky a je na nich provedeno hodnocení se zaměřením na rozměrovou přesnost.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk; odchylky; materiálové vlastnosti

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

OLEJNÍK, J. *Comparison of Deviations and Material Properties of 3D Printing: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2019, 61 p. Thesis Head: Hajnýš, J.

This bachelor thesis deals with the comparison of deviations and material properties of 3D printing. It is divided into two parts - theoretical and experimental. The theoretical part summarizes the basic principles and overview of 3D printing methods. It also summarizes the materials and their properties that are used for the printing itself. The experimental part deals with the evaluation of prints made on the 3D printer HP Jet Fusion 540 and subsequent comparison with conventional machining. In this work, test prints are designed and printed and an evaluation is performed on them with a focus on dimensional accuracy.

KEYWORDS

3D printing; deviations; material properties

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	6
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	7
ÚVOD.....	11
1 HISTORIE A STRUKTURA SIEMENS S.R.O. ZÁVOD MOHELNICE	12
2 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLEMATIKY 3D TISKU	14
2.1 3D tisk	14
2.2 Aditivní výroba	14
2.3 Současné využití 3D tisku	15
2.4 Budoucnost 3D tisku	16
2.5 Průběh/Princip 3D tisku	17
2.6 Technologie 3D tisku	18
2.6.1 Technologie SLA (Stereolithography).....	18
2.6.2 Technologie SLS (Selective Laser Sintering).....	19
2.6.3 Technologie DMLS (Direct Metal Laser Sintering).....	20
2.6.4 Technologie FDM (Fused Deposition Modeling)	21
2.6.5 Technologie MJF (Multi Jet Fusion)	22
2.7 Materiály a jejich vlastnosti	23
2.7.1 PLA (Polylactic Acid – kyselina polymléčná)	24
2.7.2 PET/PETG (polyetylen tereftalát-glykol).....	24
2.7.3 ABS Plast (Akrylonitril-butadien-styren).....	25
2.7.4 FLEX – flexibilní materiál.....	25
2.7.5 Kompozitní materiály	26
2.7.6 Ostatní materiály	26
3 EXPERIMENTÁLNÍ NÁVRH ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY	27
3.1 3D tiskárna pro experiment.....	27
3.1.1 Charakteristika tiskárny	27

3.2	Popis materiálu.....	30
3.3	Plánované využití vytisknutých přípravků.....	31
3.4	Zpracování součásti po tisku.....	32
3.5	Zhodnocení vytištěných součástí	33
3.6	Skenování přípravků	35
3.7	3D skener pro experiment	39
3.7.1	Charakteristika skeneru PreciSCAN X335	39
3.8	Vyhodnocení odchylek součástí.....	41
3.8.1	Vyhodnocení nejlépe vytisknutého modelu ve firmě SIEMENS	44
3.8.2	Vyhodnocení přípravku tisknutého externí firmou.....	47
3.8.3	Vyhodnocení originálního přípravku vyrobeného obráběním.....	51
4	KVALITATIVNÍ ZHODNOCENÍ ŘEŠENÉHO ZÁVĚRU	55
4.1	Výrobní náklady	55
	DISKUZE A ZÁVĚR.....	57
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	59

Seznam použitých značek a symbolů

ABS	Akrylonitril Butadien Styren
CAD	Computer Aided Design
DLP-SLA	Digital Light Processing – Stereolitography
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
G-kód	informace pro dráhu nástroje v prostoru kartézských souřadnic
MSLA	Mask Stereolitography
PEI	Polyetherimid
PET	Polyethylentereftalát
PLA	Polylaktid (Kyselina polymléčná)
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
STL	formát stereolitografického souboru
Ultem	termoplast skupiny výrobků PEI

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 – Letecký pohled na Siemens elektromotory, s.r.o., závod Mohelnice.....	13
Obrázek 2 – Použití aditivních technologií v různých oborech, převzato z [9].....	14
Obrázek 3 – Stavění domů pomocí 3D tisku, převzato z [14]......	16
Obrázek 4 – 3D software, převzato z [8]	17
Obrázek 5 – Technologie SLA, převzato z [16]	19
Obrázek 6 – Technologie SLS/DMLS, převzato z [16].....	20
Obrázek 7 – Technologie FDM, převzato z [23]	21
Obrázek 8 – Technologie MJF, převzato z [26]	22
Obrázek 9 – Materiály pro 3D tisk, převzato z [36]	23
Obrázek 10 – Tiskárna HP Jet Fusion 540	28
Obrázek 11 – Ukázka využití přípravků	31
Obrázek 12 – Přípravky připevněné na pracovní podložce	33
Obrázek 13 – Měřicí pracoviště.....	35
Obrázek 14 – Příprava součásti ke skenování	36
Obrázek 15 – Ukázka naskenovaného přípravku v programu Scan Viewer	38
Obrázek 16 – Skener PreciScan x335, převzato z [29].....	39
Obrázek 17 – Popis ploch přípravku pro slovní vyhodnocení.....	41
Obrázek 18 – Porovnání s referenčním modelem.....	44
Obrázek 19 – Pohled na spodní část přípravku.....	45
Obrázek 20 – Pohled na horní část přípravku.....	45
Obrázek 21 – Celkový pohled	46
Obrázek 22 – Porovnání s referenčním modelem.....	47
Obrázek 23 – Pohled na spodní část přípravku.....	48
Obrázek 24 – Pohled na horní část přípravku.....	49
Obrázek 25 – Celkový pohled	50
Obrázek 26 – Porovnání s referenčním modelem.....	51
Obrázek 27 – Pohled na spodní část přípravku.....	52
Obrázek 28 – Pohled na horní část přípravku.....	52
Obrázek 29 – Celkový pohled	53
Obrázek 30 – Model tisknutého přípravku	55
Obrázek 31 – Originální přípravek z kovu	56

Tabulka 1 – Přehled základních parametrů tiskárny HP Jet Fusion 540	29
Tabulka 2 – Obecné vlastnosti materiálu CB PA 12	30
Tabulka 3 – Technická specifikace materiálu CB PA 12	30
Tabulka 4 – Složení/informace o složkách balotiny [35]	32
Tabulka 5 – Přehled jednotlivých přípravků.....	34
Tabulka 6 – Parametry skeneru PreciScan x335	40
Tabulka 7 – Zhodnocení odchylek jednotlivých přípravků	42
Tabulka 8 – Tabulka shrnutí odchylek jednotlivých přípravků	54
Tabulka 9 – Výrobní náklady tištěného přípravku	55
Tabulka 10 – Výrobní náklady kovového přípravku	56

Úvod

V teoretické části bakalářské práce se seznámíme s 3D tiskem obecně. Řekneme si něco o současné situaci a budoucnosti 3D tisku, popíšeme si některé technologie a samotný průběh. Následně se budeme věnovat materiálům používaných k tisku, stručně si popíšeme jejich fyzikální a mechanické vlastnosti. Dále si řekneme výhody těchto materiálů a jejich doporučené teploty tisku.

Experimentální část této práce se bude zabývat porovnáním vytištěných přípravků. Cílem práce bude zjistit odchylky naměřené vzhledem k originálnímu modelu s následným vyhodnocením. Jako rozšíření experimentu je porovnání odchylek s technologií obrábění. Obráběný přípravek byl vyhotoven pomocí frézování na 3- osém frézovacím centru. Funkční plochy obráběného přípravku jsou vyrobeny z oceli a podstava je vyrobena z hliníku. Gravírování na horní části podstavy bylo následně vyhotoveno laserem. Stručně si popíšeme tiskárnu, na které se testované vzorky tiskly a také si popíšeme 3D skener pomocí kterého byly jednotlivé přípravky skenovány.

Experimentální část bude obsahovat také popis použitého materiálu pro tisk, popis následné povrchové úpravy, skenování a výrobní náklady navržených přípravků. Celou praktickou část ukončíme vyhodnocením vytisknutých součástí.

1 Historie a struktura SIEMENS s.r.o. závod Mohelnice

Siemens Mohelnice je největším evropským závodem na výrobu nízkonapěťových asynchronních elektromotorů osově výšky 63-200 mm. Tyto motory vyrábí již od roku 1924. V nabídce mají více než osmdesát tisíc aktivních variant elektromotorů. Denně jich vyrobí až čtyři tisíce. Siemens jako jediná firma na světě pokrývá prakticky celou oblast elektrotechniky a elektroniky.

V současné době je firma Siemens na trhu již 127 let. Působí ve více než 190 zemích po celém světě a zaměstnává téměř 350 000 lidí. Export jejich výrobků je určen do 58 států na celém světě. V České republice můžeme najít její zastoupení v 8 výrobních závodech, které jsou rozprostřeny po celé České republice. Siemens Elektromotory v Mohelnici patří s bezmála 1500 pracovníky mezi nejvýznamnější zaměstnavatele v severomoravském regionu.

Motory, které vyvíjí a vyrábí, jsou určeny především k pohonu průmyslových zařízení, jako jsou ventilátory, čerpadla, kompresory, obráběcí stroje či hydraulické komponenty. Jejich motory splňují poptávku po vysoké kvalitě a technické úrovni. Zákazníkům firma poskytuje perfektní servis.

V roce 1945 je podnik znárodněn a přejmenován na MEZ, Moravské elektrotechnické závody. Technici projektují nové řady elektromotorů, rozrůstá se jak plocha závodu, tak i počet zaměstnanců a roční objem výroby. Ten se z objemu 57 000 vyrobených motorů vyšplhá až na milion kusů elektromotorů vyrobených v roce 1967.

V roce 1960 dochází k otevření kokilové slévárny, jediné svého druhu v Evropě. Ta v areálu Siemens v Mohelnici funguje až do roku 2014. MEZ Mohelnice získává za technologii použitou v kokilové slévárně státní vyznamenání. O rok později získává podnik Zlatou medaili z Mezinárodního strojírenského veletrhu v Brně za novou řadu elektromotorů 3AP 63-90.

V osmdesátých letech vznikají další nové řady elektromotorů, například série komutátorových elektromotorů SK 80 určených pro moderní pohony v automatických pračkách. Roční objem výroby dosahuje před dva a půl milionu kusů.

V roce 1994 je podnik privatizován a znovu funguje pod značkou Siemens. Výrobní program je dále rozšiřován. V závodě pracuje přes dva tisíce zaměstnanců.

V roce 2004 závod jako první velký strojírenský podnik v ČR zřizuje chráněnou dílnu přímo v rámci výroby. Práci v ní najdou čtyři desítky zaměstnanců.

V roce 2012 je otevřena nova montážní hala. K výrobě standardních motorů mohelnický závod přidává výrobu speciálních provedení na klíč, dle přání zákazníků.

V roce 2015 přichází Siemens s projektem Restart v rámci, něhož získávají práci a další podporu lidé ohrožení bezdomovectvím.

Od roku 2012 do roku 2016 závod postupně zavádí výrobu Brandgass elektromotorů, Steel Plant motorů, reluktančních motorů a Rollgang motorů.

V roce 2018 převážnou část produkce tvoří motory vyráběné přesně podle individuálních požadavků zákazníků. V nabídce mají více než osmdesát tisíc aktivních variant elektromotorů.



Obrázek 1 – Letecký pohled na Siemens elektromotory, s.r.o., závod Mohelnice

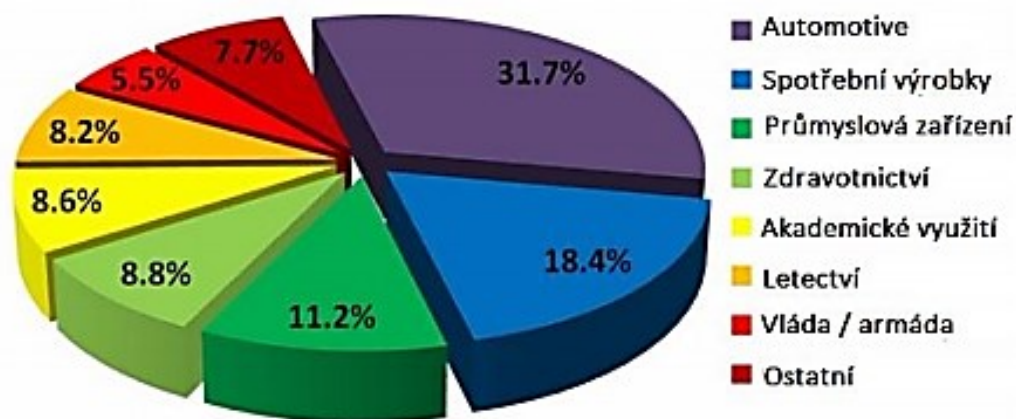
Legenda:

- | | |
|---------------------|-------------------------|
| 1 – Správní budovy | 6 – Lisovna |
| 2 – Slévárna | 7 – Montáž |
| 3 – Obrobna odlitků | 8 – Předmontáž a montáž |
| 4 – Navijárna | 9 – Logistické centrum |
| 5 – Stará slévárna | |

2 Teoretický rozbor problematiky 3D tisku

2.1 3D tisk

Jedná se o automatizovaný proces, pomocí kterého jsme schopni z již vytvořené předlohy, nejčastěji 3D modelu vytvořit fyzický model. Pomocí tohoto automatizovaného procesu vytváříme trojrozměrné objekty prostřednictvím 3D tiskárny. Výsledný objekt následně vzniká postupným nanášením vrstev stavebního materiálu, které se spojují natavováním tenkého proužku materiálu. Tato technologie se řadí mezi aditivní metody výroby. Díky této technologii je možné vytvářet komplikované tvary a zpracovávat materiály, které mohou být pro jiné výrobní metody těžce zhotovitelné. V dnešní době se využívá v nejrůznějších oblastech průmyslu. Největších výhod 3D tisku je dosud využíváno ve výrobě prototypů (Rapid Prototyping) nebo v malosériové výrobě. [1; 2; 7]



Obrázek 2 – Použití aditivních technologií v různých oborech, převzato z [9]

2.2 Aditivní výroba

Označuje proces, pomocí kterého vzniká výrobek postupným nanášením tenkých vrstev materiálu po konstantních tloušťkách. Následně dochází k vzájemnému spojování jednotlivých vrstev materiálu například tavením nebo lepením., čímž dochází k vytvoření konečného výrobku. Aditivní výroba se zejména využívá k označování procesů, při kterých vzniká

koncový výrobek, a nikoliv pouze prototyp. Tento proces využívá modelovací software Computer-Aided-Design (CAD) nebo 3D objektové skenery, které umožňují přesné zobrazování geometrických tvarů. Americká norma ASTM F42 rozlišuje aditivní výrobu do 7 skupin, na fotopolymerizaci, vstřikování materiálu, vstřikování pojiva, vytlačování materiálu, tavení prášku, laminování a řízené navařování.

Aditivní výroba je dalším technologickým pokrokem, který umožňuje vytváření lehčích a komplexních součástí, které by byly drahé a složité na výrobu pomocí tradičních metod obrábění. Za poslední desetiletí prošla vlastní digitální revolucí. V dnešní době přináší aditivní výroba digitální flexibilitu a účinnost do výrobních operací. [3; 4; 5; 11]

2.3 Současné využití 3D tisku

V současné době je problematika 3D tisku velice diskutovaným tématem. Za posledních několik let došlo ke značnému rozvoji v tomto oboru. V současnosti nachází 3D tisk uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu, ať už ve strojírenství, stavebnictví, architektuře, automobilovém průmyslu, zdravotnictví, robotice a v mnoha dalších. 3D tiskárny mají veliký potenciál a díky tomu se jejich využití neustále rozrůstá. 3D tisk se nejen rozvíjí technicky, ale hledají se různé způsoby provedení, velikosti a druhy materiálu použitého pro tisk.

Největších výhod 3D tisku se využívá v malosériové výrobě. 3D tisk vyjde často levněji, pokud plánujeme vyrábět sérii produktů, která je příliš malá na odůvodnění vysokých nákladů spojených s přípravou výroby. Dalším kladem je případné ušetření nákladů na přípravu výroby. Pokud bude nutné provést změny tištěného produktu nemusíme znovu platit náklady na přípravu výroby. V tomto případě je nutné pouze provést úpravy v 3D modelu a vytisknout novou verzi produktu. Díky tomu jsme schopni provádět změny jednotlivých produktů rychle bez dalších nákladů.

Aktuálně se na trhu nachází tiskárny s nízkou pořizovací cenou a díky tomu jsou dostupné i pro širokou veřejnost. Na základě poklesu pořizovací ceny se 3D tiskárny stále častěji využívají i v domácím prostředí. 3D tisk výrazně usnadnil výrobu různých dílů. Ať už se jedná o náhradní díly, které jsou méně dostupné, až po nejružnější věci využívané v každodenní domácnosti. [2; 10; 12]

2.4 Budoucnost 3D tisku

V oblasti 3D tisku nás čeká začleňování více dílových sestav, které budou umožňovat výrobu dílů z kovů a plastů v jediném okamžiku. To nám přináší určité výhody, které budou umožňovat tisk kovů do plastových dílů, vyrábět vodivé součásti odolné proti opotřebení a mnoho dalšího. Další změnou bude zrychlení kódování digitálních informací do tištěných 3D textur, snížení produkce odpadu s ohledem na životní prostředí a rozvoj v dalších sektorech výroby, jako je například oční optika a stomatologie.

Do budoucna se plánuje spousta zajímavých projektů, které jsou stále daleko od realizace. Diskutuje se například o tisku mimo naši planetu, konkrétně na Měsíci, kde by měla být podle Evropské vesmírné agentury postavena základna pro astronauty. Velkého rozvoje se dočkáme ve sféře stavebnictví, kde je v plánu 3D tisk celého domu pomocí rozměrných tiskáren. Dalším praktickým využitím 3D tiskáren v budoucnosti by byl tisk orgánů k transplantaci. Nyní je s transplantací orgánů spojena většinou dlouhá čekací doba na správného dárce a 3D tiskárny by tuto situaci mohly zjednodušit. [10; 13; 15]



Obrázek 3 – Stavění domů pomocí 3D tisku, převzato z [14].

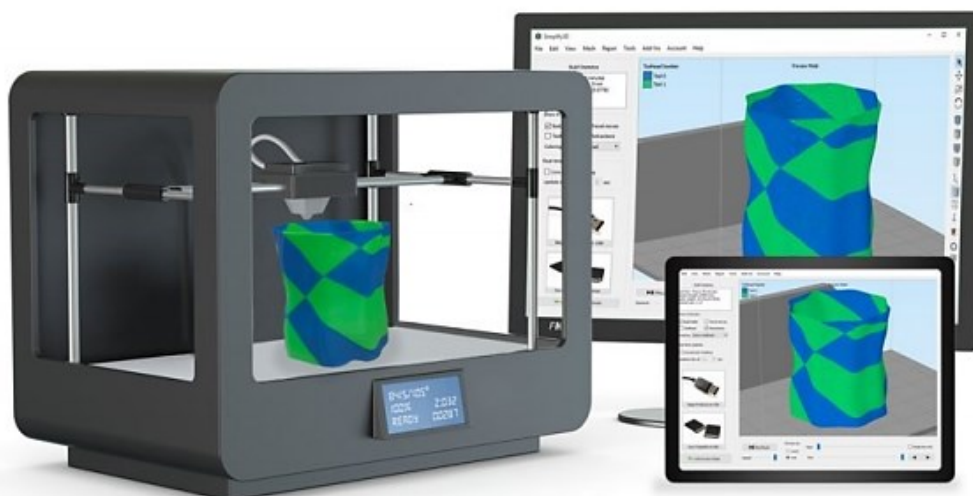
2.5 Průběh/Princip 3D tisku

K vytištění samotné součásti je třeba několika kroků, které na sebe navazují v dané posloupnosti. Pokud chceme vytisknout požadovanou součást, je potřeba vyhotovit její virtuální návrh (3D model). Pro její zhotovení máme více možností, ale nejčastějším způsobem je vyhotovení pomocí modelovacího programu Computer-Aided-Design (CAD). Ačkoliv se jedná o jednoduchý způsob, tak modelování v CAD softwaru vyžaduje určité znalosti tohoto programu. Dalším způsobem modelování může být použitím 3D skeneru. 3D skener je přístroj, kterým jsme schopni naskenovat a vytvořit velmi přesnou kopii daného předmětu s následným převedením do digitální podoby. Naskenovaná součást může obsahovat nedostatky, které jsme schopni upravit v příslušném CAD softwaru. V případě použití 3D skeneru není virtuální návrh v softwaru nutný.

Po vytvoření 3D modelu v CAD softwaru, jej musíme převést do formátu, který je kompatibilní se softwarem tiskárny. Tento formát se nazývá stereolithography (STL.).

Dalším krokem po zhotovení 3D modelu je vytvoření instrukcí tzv. G-kódů pro samotnou tiskárnu. G-kódy obsahují například pohyb motorů, ovládání trysek a další potřebné informace pro tisk. K vytvoření G-kódů se nejčastěji používají programy Skeinforge, Slic3r nebo Cura. Dle vytvořených instrukcí je následně G-kód poslán do tiskárny, která na základě daných informací vytiskne požadovaný objekt.

Po splnění všech předchozích bodů může dojít k samotnému tisku. Vytisknutý objekt se následně podle dalších požadavků povrchově upravuje. [6; 7]



Obrázek 4 – 3D software, převzato z [8]

2.6 Technologie 3D tisku

Zvolení vhodné technologie 3D tisku musíme pečlivě zvážit, protože se od ní budou odvíjet následující postupy. Její volbou jsme také ovlivněni dle požadavků kladených na tisknutou součást. Nejvhodnější technologii 3D tisku volíme ve snaze vyhovět požadavkům různých materiálů, dále bereme v potaz zkrácení výrobní doby a nesmíme zapomenout na pevnostní vlastnosti konečného produktu. Známe celou řadu technologií a jejich použití je rozmanité, lze je rozdělit dle několika kritérií. Aktuálně neexistuje žádná technologie 3D tisku, která by byla univerzální a vhodná pro všechna použití. Proto je třeba pečlivě zvážit, co budeme na tiskárně tisknout, a co od ní požadujeme.

Nejvhodnějším kritériem je stavební materiál, ze kterého jsou objekty tištěny. Dle substance jej rozdělujeme do tří kategorií, ve které je samotný materiál tištěn, a to jako práškový materiál, tekutý materiál a pevný materiál. [2]

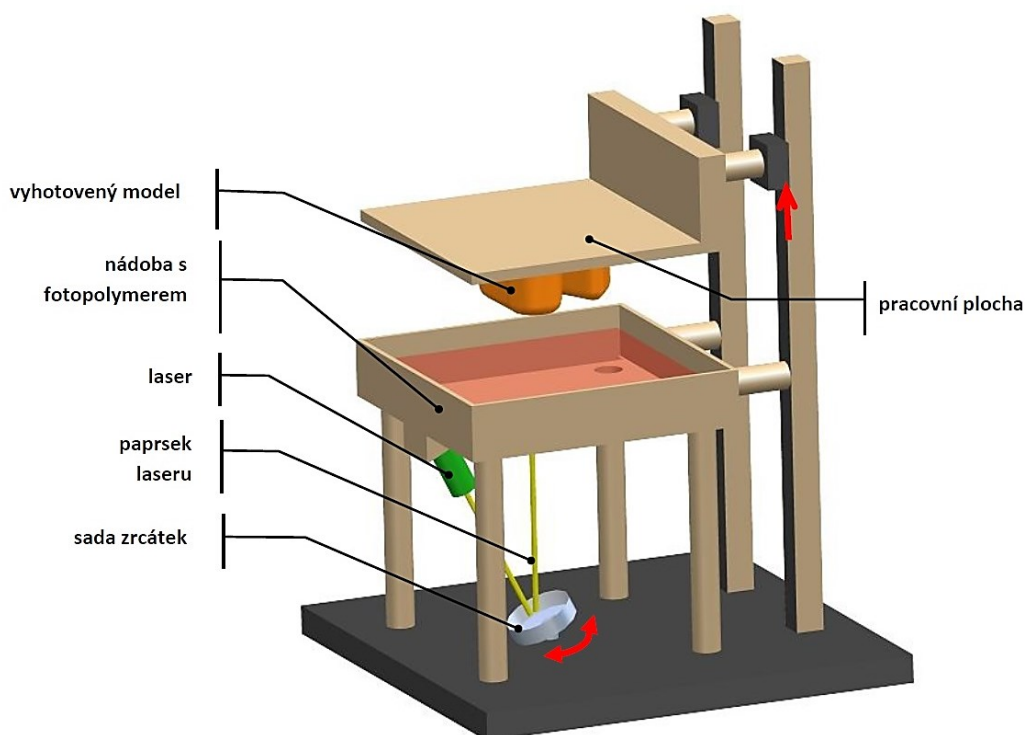
2.6.1 Technologie SLA (Stereolithography)

Jedná se o nejstarší a v dnešní době rozšířenou metodu, která nachází své místo a je stále značně využívána. Radíme ji do aditivních procesů výroby. Rozlišujeme 3 kategorie SLA procesu (SLA – Laser, DLP-SLA, MSLA). Jejím typickým znakem je tekutý polotovar – fotopolymer, což je plast reagující na světlo, například pryskyřice. Tento polymer se po zasažení paprskem UV laseru přemění na pevný. Tato technologie využívá ultrafialový paprsek, který postupně vytvrzuje daný materiál.

Tiskárny využívající této technologie jsou opatřeny laserem, který je ovládán počítačem a na základě vytvořeného modelu v softwaru CAD kopíruje jeho tvar. Podložka se při každé kladené vrstvě posune a tím dochází k vytvrzení fotopolymeru na požadovaných místech. Její výhodou je přesnost a vysoká povrchová kvalita tištěné součásti. Součásti vytisknuté touto technologií mají velice hladký povrch a nejsou na nich vidět patrné vrstvy materiálu. Avšak nevýhodou může být menší tisková plocha a toxicita vstupního polotovaru.

Takto vytištěný model není vhodný pro okamžité použití, je lepkavý, protože je na povrchu znečištěný polymerem. Pro dokonalé očištění se model čistí v rozpouštědle, který odstraní zbytky polymeru. Následně se model vkládá do UV pece, kde dojde k vytvrzení. Tyto látky

nejdou bezpečné pro naše zdraví, ať už v průběhu tisku, kdy vznikají výpary, nebo při následném očišťování modelu. Pro tyto případy jsou vyrobeny automatické mycí a vytvrzovací stanice, které zaručí hladký průběh tohoto procesu. Mezi výhody této technologie patří vysoká přesnost v řádu mikronů. Mezi nevýhody potom dotvrzení vytisknutého modelu a možnost použití pouze fotocitlivých materiálů (polymerů). [2; 17; 16; 18; 19; 20]



Obrázek 5 – Technologie SLA, převzato z [16]

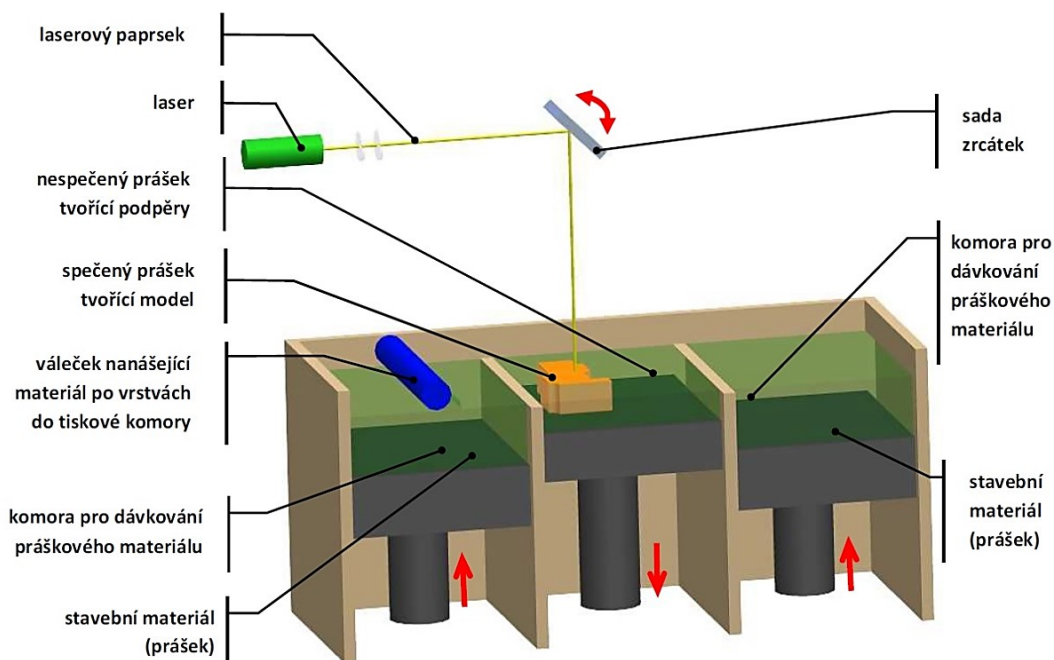
2.6.2 Technologie SLS (Selective Laser Sintering)

Další používanou technologií je SLS. Radíme ji do aditivních procesů výroby. U této technologie dochází k postupnému tavení práškového materiálu plastové nebo keramické struktury. Jako materiál se používá například Nylon, ABS, PET. Před samotným tiskem je nutností nanést vrstvu prášku na celou podkladovou plochu, kterou následně laser zahřeje na bod tavení materiálu. Po zahřátí celé plochy se sníží podkladová plocha o tloušťku jedné vrstvy a nanese se další vrstva. Tento cyklus je opakován až do zhotovení celého modelu. Stejně jako předchozí technologie, tak i tato využívá laser k vytvrzování materiálu. Ve většině případů se používá prášek, který se během tisku nové vrstvy vždy nanáší pomocí válce, prášek se následně laserem spéká. Výhodou této technologie je nízká pořizovací cena materiálu a možnost dalšího

zpracování přebytečného prášku, který lze dále použít k vytisknutí dalšího modelu. Avšak mezi nevýhody řadíme vysoké náklady kladené na pořízení a nedokonalý povrch vytisknutého modelu. [2; 16; 17; 21; 22]

2.6.3 Technologie DMLS (Direct Metal Laser Sintering)

Tato technologie funguje na stejném principu jako technologie SLS, s tím rozdílem, že je založena na tisku kovových modelů. Materiál u této technologie je také vytvrzován pomocí laserového zařízení, jak je tomu u metody SLS. Aby laser dokázal přetavit kovový prášek, musí vyvinout větší teplotu než u SLS, kde se taví pouze plastové materiály nebo keramika. Proto je jedním z rozdílů mezi SLS a DMLS výkon laseru. Materiál je v tomto případě kov, a to například nerezová ocel, titan, bronz, inconel. Výhodou této technologie je možnost zhotovení poměrně složitých tvarů, a to bez použití podpory, minimální odpad materiálu, kvalitní povrch s možností barevného tisku s vysokým rozlišením. Mezi nevýhody řadíme křehkost modelu a vysokou pořizovací cenu tiskárny. [2; 16]

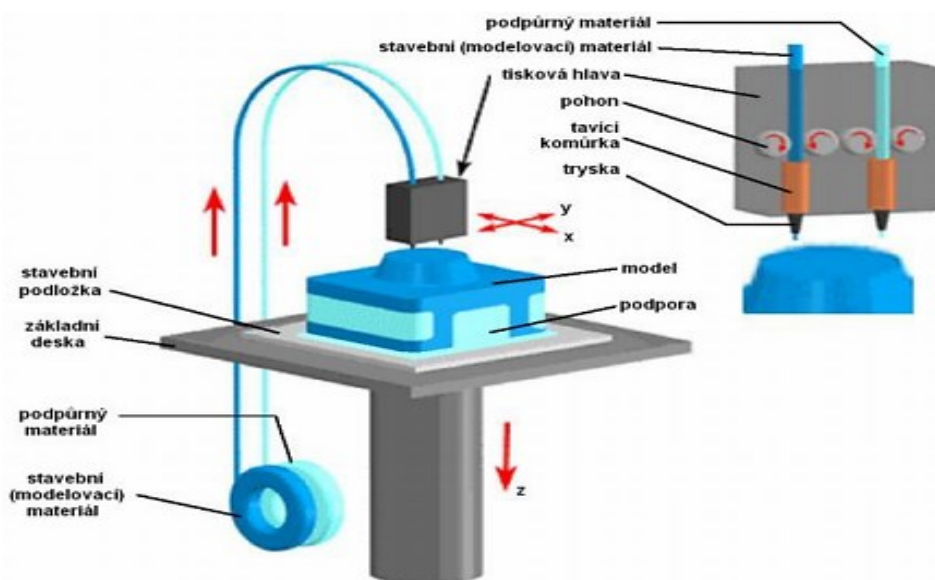


Obrázek 6 – Technologie SLS/DMLS, převzato z [16]

2.6.4 Technologie FDM (Fused Deposition Modeling)

Fused Deposition Modeling patří mezi nejrozšířenější a nejdostupnější technologii 3D tisku. Stavebním materiálem této metody je roztavený plast, který se taví uvnitř extruzní hlavy. Nejčastěji používanými materiály pro technologii FDM jsou termoplasty ABS a PLA nebo pak dále speciální termoplasty typu Ultem. K samotnému spuštění tiskové úlohy se používají dva druhy materiálů, z nichž první tvoří konstrukční část a je z něj vyroben konečný model. Druhý materiál tvoří podpornou část, která je po dokončení tiskové úlohy odstraněna. Tato podporná část je nanášena stejným způsobem, jen jinou tryskou a jiným materiálem, který bývá křehčí z důvodu snadného odstranění.

Samotný materiál je namotán na cívce, ten se díky podávacímu zařízení vtlačuje do trysky, kde se nanáší v polotekutém stavu na pracovní stůl. Při pohybu extruzní hlavy v osách X a Y dochází k postupnému nanášení vrstvy po vrstvě v podobě tenkého vlákna (filamentu). Jakmile vyteče materiál z trysky a naváže kontakt s pracovní podložkou, tam dochází k jeho tuhnutí. Po každé nanesené vrstvě dojde ke snížení pracovní podložky o hodnotu nanesené vrstvy. Tento postup je opakován a díky postupnému nanášení vrstev dochází k zhotovení požadovaného objektu. Mezi výhody této technologie 3D tisku patří dobré mechanické vlastnosti konečného výrobku a minimální odpad. Nevýhodou pak může být odstraňování podpůrného materiálu, který vzniká při samotném tisku. [2; 16; 20; 24]

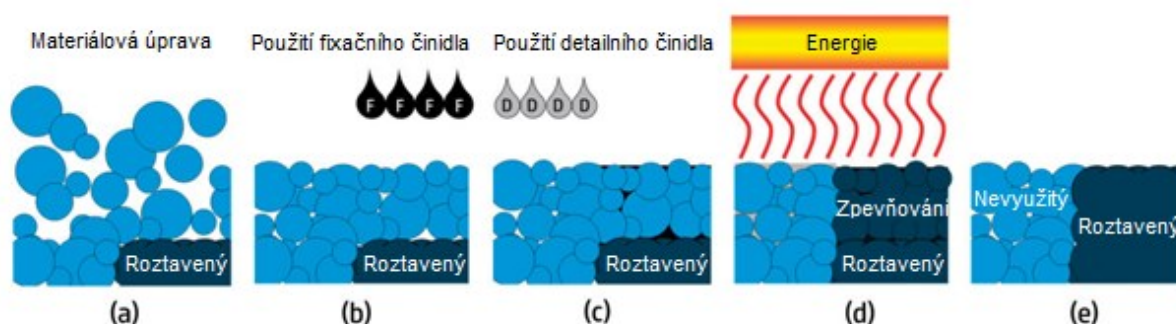


Obrázek 7 – Technologie FDM, převzato z [23]

2.6.5 Technologie MJF (Multi Jet Fusion)

Jedná se o technologii 3D tisku vytvořenou společností HP, která je principem podobná stereolitografii. Tato technologie je na trhu poměrně krátce, konkrétně od roku 2014. Přináší možnost snížit náklady 3D tisku na úroveň běžné výroby plastových dílů a zkrácení doby vyhotovení modelů. Díky tomu ji můžeme vhodně využít i pro sériovou výrobu. Zároveň tato technologie umožňuje tisknout plnobarevné modely, které jsou odolné a schopné zvládnout namáhání. K samotnému tisku využívá práškový materiál bez následného použití laseru.

Průběh tisku probíhá nejdříve zahřátím prostoru pro nanášení prášku. Následně jsou stříkáním nanášena spojovací činidla na místa, kde je potřeba roztavit částice a zajistit vysoké rozlišení povrchových detailů. Stříkaný materiál zachycuje teplo a pomáhá jej rovnoměrně šířit. Technologie Multi Jet Fusion využívá materiál PA 12 s jemným zrnem, se kterým lze dosáhnout ultra tenkých vrstev o tloušťce 80 mikronů. Díky tomu jsme schopni vyrábět díly s vyšší hustotou a nižší pórovitostí. U větších modelů HP tiskáren se používá materiál PA 11. Vytisknuté modely mají hladký povrch a funkční díly je potřeba pouze minimálně povrchově upravit. Mezi výhody této technologie 3D tisku patří výroba vysokých počtů stejných kusů, možnost tisknutí součástí s vysokým rozlišením a drobnými detaily, je 5x rychlejší a umožňuje až 66 % úsporu materiálu oproti technologii SLS, jedna součástka může obsahovat materiály s různými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Mezi nevýhody patří pořizovací cena, porézní povrch vytisknutých součástí a menší pevnost oproti jiným technologiím. [25; 26; 27]



Obrázek 8 – Technologie MJF, převzato z [26]

2.7 Materiály a jejich vlastnosti

Vhodný výběr materiálu má velký vliv na výsledné vlastnosti a celkové chování modelu, z tohoto důvodu je třeba znát vlastnosti zvoleného materiálu. Dalším aspektem pro vhodný výběr materiálu jsou také jeho mechanické vlastnosti, které jsou ovlivněny samotným průběhem tisku. V dnešní době existuje celá řada materiálu jako kovy, keramika, plasty, které jsou již běžně využívány pro aditivní výrobu nebo průmyslové prototypování. Z těchto materiálu však stále převládá využití plastu. Níže si blíže specifikujeme nejpoužívanější materiály pro 3D tisk. [30]



Obrázek 9 – Materiály pro 3D tisk, převzato z [34]

2.7.1 PLA (Polylactic Acid – kyselina polymléčná)

Patří mezi nejčastěji používané a univerzální materiály pro 3D tisk metodou extruze termoplastu. Tento materiál je získáván z obnovitelných zdrojů, nejčastěji z kukuřičného škrobu a je biologicky odbouratelný. Hlavní surovinou při jeho výrobě jsou přírodní látky a rostlinná biomasa. Nemá žádné nežádoucí zdravotní účinky a je možné jej ekologicky likvidovat, aniž by bylo zatěžováno životní prostředí.

Výtisky z tohoto materiálu jsou velmi tvrdé, ale tudíž i křehké a méně odolné vůči vyšším teplotám, než je tomu i jiných materiálů. Jedná se o materiál, který je snadno a rychle zpracovatelný a je schopen si zachovat svou pružnost, tvrdost a odolnost. Díky jeho nízké tepelné roztažnosti se především volí pro tisk velkých objektů a pro tisk detailních drobných modelů. Teplota tání je relativně nízká, činí 175°C. Přes tuto teplotu tání je možné jej opakovaně zahřívat s velmi malou degradací materiálu.

Doporučená teplota trysky je 215 °C a teplota podložky 50-60°C. Jedná se o jediný materiál ověřený pro tisk 50 mikronových vrstev. Mezi nevýhody tohoto materiálu patří, že v hodně vlhkém prostředí pohlcuje vlhkost, přičemž vznikají bublinky na jeho povrchu. Tím pádem je citlivý na podmínky skladování. Při samotném průběhu tisku může dojít k několika komplikacím, jako například zápach nebo rozpustnost v hydroxidu solném. Po ukončení tiskového procesu se materiál špatně zpracovává. [31; 32; 33]

2.7.2 PET/PETG (polyetylén tereftalát-glykol)

Polyethylentereftalát (PET) je nejvíce používaný plast na světě. Jedná se o materiál, který je vhodný především pro tisk mechanických částí. Nabízí mnohem lepší mechanické vlastnosti než PLA. Písmeno G ve zkratce označuje glykol, ten je přidáván během výrobního procesu a upravuje vlastnosti PET. Glykol zaručí menší křehkost a lepší průhlednost při tisku s poloprůhlednými variantami. Tento materiál je střední cestou mezi PLA a ABS.

Při tisku z tohoto materiálu je důležité použít vyhřívaný stůl. Tento materiál je lesklý, tuhý, houževnatý, pružný a zdravotně nezávadný. Díky jeho pružnosti se často jen dočasně prohne, což zabrání prasknutí. Vyznačuje se dobrou tepelnou odolností a odolností vůči mechanickému poškození. Má malou tepelnou roztažnost, což se projeví při tisku velkých modelů, kdy se

zřídka kdy zkroutí a odlepi od vyhřívané podložky. Doporučená teplota trysky je 240 °C a teplota podložky 80-100 °C. [31; 32; 33]

2.7.3 ABS Plast (Akrylonitril-butadien-styren)

Tento materiál je jeden z nejpobulárnějších a nepoužívanějších materiálů, využívajících pro tisk FDM technologií. Jedná se o termoplast, takže je jej možné opakovaně roztavit a krystalizovat, aniž by došlo k znehodnocení materiálu. Je rozpustný v acetonu a tím je možné výtisky vyhladit acetonovými výpary a dosáhnout tak dokonale lesklého povrchu. Díky vyšší teplotě tání má tento materiál výbornou tepelnou odolnost a vytisknuté modely se nebudou deformovat až do 98°C. Zároveň je tuhý, houževnatý, málo nasákavý a zdravotně nezávadný. Vyniká také odolností vůči kyselinám, uhlovodíkům, tukům, olejům. Při tisku z tohoto materiálu je důležité použít vyhřívaný stůl a potřeba počítat s mírnými výpary a z tohoto důvodu zajistit odvětrávání. Nevýhodou je obtížný tisk tohoto materiálu. Je nutný box pro udržení stálé teploty okolí a proti průvanu. Díky velké tepelné roztažnosti se výtisky z ABS krouť, smršťují a tím praskají. Obsahuje příměs syntetického kaučuku, díky tomu je odolnější proti opotřebení a nárazům. Doporučená teplota trysky je 255 °C a teplota podložky 100 °C až 110 °C při tisku větších modelů. Pro neupravený ABS je charakteristická bílá až krémová barva a může se obarvit také různými barvivy a pigmenty. [31; 32; 33]

2.7.4 FLEX – flexibilní materiál

Materiál, který se svou strukturou podobá gumě. Díky tomu je jeho velkou výhodou právě flexibilita a také je velmi silný. Tento materiál má velice dobrou odolnost proti otěru, zachovává si pružnost i při nízkých teplotách a je odolný vůči celé řadě rozpouštědel. Existuje několik variant tohoto materiálu, každý se vyznačuje jiným koeficientem pružnosti.

Výhodou tohoto materiálu je také jeho velká pevnost v tahu a minimální smrštění po ochlazení tohoto materiálu, takže je s ním možné tisknout přesné modely. Mezi nevýhody potom řadíme jeho cenu, jedná se o drahý materiál. Nelze jej použít na všech tiskárnách, pouze na těch, které mají přímý extruder. Doporučená teplota trysky je 230 °C a teplota podložky je 50 °C až 65 °C při tisku větších objektů. Dále je potřeba, aby byl tisk pomalý a nedocházelo

k ucpávání extruderu. Jeho využití je například při tisku krytů na telefon či elektroniky a jiných funkčních prototypů. [31; 33]

2.7.5 Kompozitní materiály

Jedná se o materiály primárně založené na plastové složce a sekundárním materiálu ve formě prachu. Mezi kompozitní materiály řadíme například woodfill, copperfill, bronzefill a karbonové kompozity. Tyto materiály se používají díky jejich dekorativnímu vzhledu především pro tisk interiérových výzdob či jiných dekorací. Jedná se o materiály velmi abrazivní, což může při dlouhodobém tisku způsobit poškození trysky, z tohoto důvodu se doporučuje použít trysku tvrzenou. Vzhledem k tomu, že tyto materiály obsahují příměsky sekundárního materiálu, které mohou způsobit ucpání trysky, doporučuje se použít trysku s průměrem minimálně 0,5 mm. Pro finální vzhled výtisku je možné jej dále leštit brusným papírem. Doporučená teplota trysky je 190-210 °C a teplota podložky je 50-70 °C. [31; 33]

2.7.6 Ostatní materiály

V dnešní době existuje již celá řada materiálu pro 3D tisk. Výše jsem zmínil nejvíce používané materiály v oblasti 3D tisku. Nicméně mezi další materiály řadíme například vinyl, karbon, polypropylen, nylon. Dále existují materiály, které jsou rozpustné ve vodě nebo mají samozhášivé vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou však vykompenzovány vysokou pořizovací cenou. [31; 33]

3 Experimentální návrh řešení problematiky

V experimentální části si popíšeme jednotlivé úseky, které jsem zmiňoval v úvodu. Ze začátku si ale blíže specifikujeme tiskárnu, na které probíhal tisk přípravků. Popíšeme si software tiskárny a používaný materiál. V tabulce si shrneme její základní parametry. Následně si popíšeme průběh skenování součástí a charakterizujeme si používaný skener. Také si porovnáme přípravek, který se vyrábí konvenčním obráběním s vytištěným ve firmě SIEMENS Mohelnice. Veškeré informace týkající se bližší specifikace přípravků, vyhodnocování rozměrové přesnosti si následně shrneme do tabulek, popřípadě si blíže rozebereme jednotlivé úseky a poukážeme na případné problémy spojené s vypracováním této části bakalářské práce.

3.1 3D tiskárna pro experiment

3.1.1 Charakteristika tiskárny

Pro tisk přípravků byla použita 3D tiskárna HP Jet Fusion 540 využívající technologii MJF (Multi Jet Fusion). Tato tiskárna slouží k tisku dílů z termoplastu o vysoké kvalitě a s optimálními mechanickými vlastnostmi. Zároveň disponuje vysokou rozměrovou přesností ve stálé kvalitě a tiskem čistě bílých modelů s vynikajícím vzhledem. Zaručuje plně integrované a soudržné tiskové řešení, které je nenáročné na obsluhu. Dosažení těchto vlastností je možné díky aplikacím HP SmartStream 3D Build Manager a HP SmartStream 3D Command Center. Tyto aplikace se starají o souvislý chod tiskárny.

Díky této průlomové technologii firmy HP je možné tisknout až 10x rychleji. Na každý cm^2 dopadá přes 10 milionů kapiček agentů za sekundu. Dále je možné ochlazování dílů pomocí profilu chlazení Auto cool & reclaim (Automaticky ochladit a vrátit). Mezi další funkce patří například přesné měření teploty při tisku každé vrstvy, což umožňuje dosahovat optimálních mechanických vlastností. Díky tomuto systému podporuje také automatické míchání, plnění a recyklaci stavebního materiálu.

Používá se pro prototypování i tisk funkčních dílů v objemu do 100 ks týdně. Tiskárna používá směs čerstvého a opětovně použitelného materiálu. Tyto materiály jsou rozděleny do dvou přihrádek pro kazety na čerstvý materiál a použitý materiál. Kazety mají kapacitu 10 litrů.

Zkoumané přípravky byly tisknuty materiálem CB PA 12, jehož konfigurace se řídí poměry 20 % čerstvého materiálu a 80 % opětovně použitelného materiálu. Software tiskárny udržuje poměry těchto materiálů.



Obrázek 10 – Tiskárna HP Jet Fusion 540

Tabulka 1 – Přehled základních parametrů tiskárny HP Jet Fusion 540

Výkon tiskárny	Technologie	HP Multi Jet Fusion
	Tiskový prostor	Až 332 x 190 x 248 mm
	Rychlost tisku	2340 cm ³ /hod
	Doba tisku při zaplnění tiskového prostoru do maximální výšky (248 mm)	18 hodin
	Doba tisku při zaplnění tiskového prostoru do výšky 25 mm	5 hodin
	Tloušťka vrstvy	0,08mm
	Tiskové rozlišení	1200dpi
Rozměry (š x h x v)	Tiskárna	1565 x 955 x 1505 mm
	Manipulační prostor	2785 x 2530 x 2440 mm
Hmotnost	Tiskárna	650 kg
Provozní podmínky	Provozní teplota	20–30 °C
	Provozní vlhkost	20–70 % RV (bez kondenzace)
Připojení	Gigabit Ethernet (10/100/100Base-T), podpora následujících standardů: TCP/IP, DHCP (pouze IPv4), TLS/SSL	
Hard disk	HDD 1TB (AES-256 šifrování, disk wipe DoD 5520M) & SSD 1TB (AES-256 šifrování)	
Software	Dodávaný software	HP SmartStream 3D Build Manager
		HP SmartStream 3D Command Center
	Podporovaný formát souborů	3MF, STL, OBJ, VRML v.2
Napájení	Spotřeba	4,5- 6,3kW (v průměru)
	Požadavky	Zapojení ve vyhrazeném okruhu: vstupní napětí 200–240 V (sdružené), max. 36 A, 50/60 Hz

3.2 Popis materiálu

Pro tisk součástí byl použit materiál CB PA 12. Tento materiál se používá pro tisk pevných a složitých funkčních součástí, používaných v nejrůznějších průmyslových odvětvích. Jedná se o robustní termoplastický materiál schopný vytvářet součásti o vysoké hustotě, pevné finální struktuře povrchu a vysoké rozměrové přesnosti. Poskytuje vynikající odolnost vůči chemikáliím, například olejům, alifatickým uhlovodíkům a zásadám. Je ideální na tisk barevných a bílých součástí s optimálními mechanickými vlastnostmi.

Tabulka 2 – Obecné vlastnosti materiálu CB PA 12

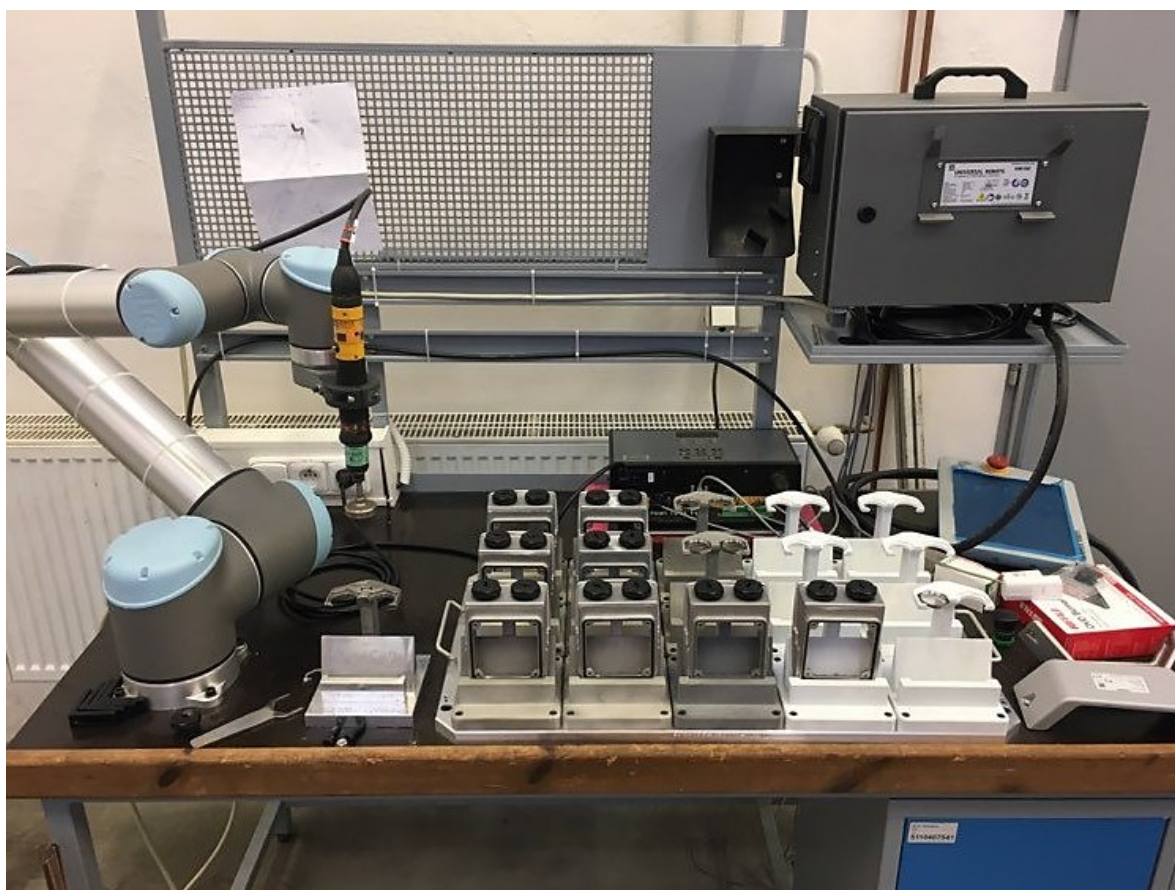
Kategorie	Měření	Hodnota	Metoda
Obecné vlastnosti	Bod tání prášku (DSC)	189 °C	DIN EN ISO 11357
	Teplota samovznícení	400 °C	-
	Teplota rozkladu	350 °C	-
	Velikost částic	58 µm	ISO 8130/13
	Objemová hustota prášku	0,442g/cm ³	ISO 60
	Hustota dílů	1,03g/cm ³	ASTM D792
Opětovné použití	Minimální obnovovací poměr pro stabilní výkon	20 %	-

Tabulka 3 – Technická specifikace materiálu CB PA 12

Kategorie	Měření	Hodnota	Metoda
Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu, maximální zatížení, XY	46 MPa	ASTM D638
	Pevnost v tahu, maximální zatížení, Z	46 MPa	ASTM D638
	Modul v tahu, XY	1600 MPa	ASTM D638
	Modul v tahu, Z	1700 MPa	ASTM D638
	Prodloužení při přetržení, XY	20 %	ASTM D638
	Prodloužení při přetržení, Z	14 %	ASTM D638

3.3 Plánované využití vytisknutých přípravků

Vytisknuté součásti se po prozkoumání jejich mechanických vlastností a zhodnocení rozměrové přesnosti následně plánují využít jako přípravky pro robotizované pracoviště. Tyto pracoviště v dnešní době zaznamenávají veliký rozvoj především díky jejich rychlosti, přesnosti manipulace a celkové efektivnosti. Ve firmě SIEMENS se tak plánuje postupná realizace tohoto pracoviště, ale v dosavadní situaci budou na výrobu dohlížet zaměstnanci, kteří budou doplňovat potřebný materiál. Do budoucna je však představou realizace kompletní výroby pomocí těchto manipulátorů, kteří budou naprogramováni pro konkrétní operace a bude jimi zajištěna kompletní výroba. Díky takto zajištěné výrobě bude zlepšena produktivita. Vytisknuté přípravky budou využity na tomto pracovišti, kde budou využívány při montáži svorkovnicových zátek UR kolaborativním robotem.



Obrázek 11 – Ukázka využití přípravků

3.4 Zpracování součásti po tisku

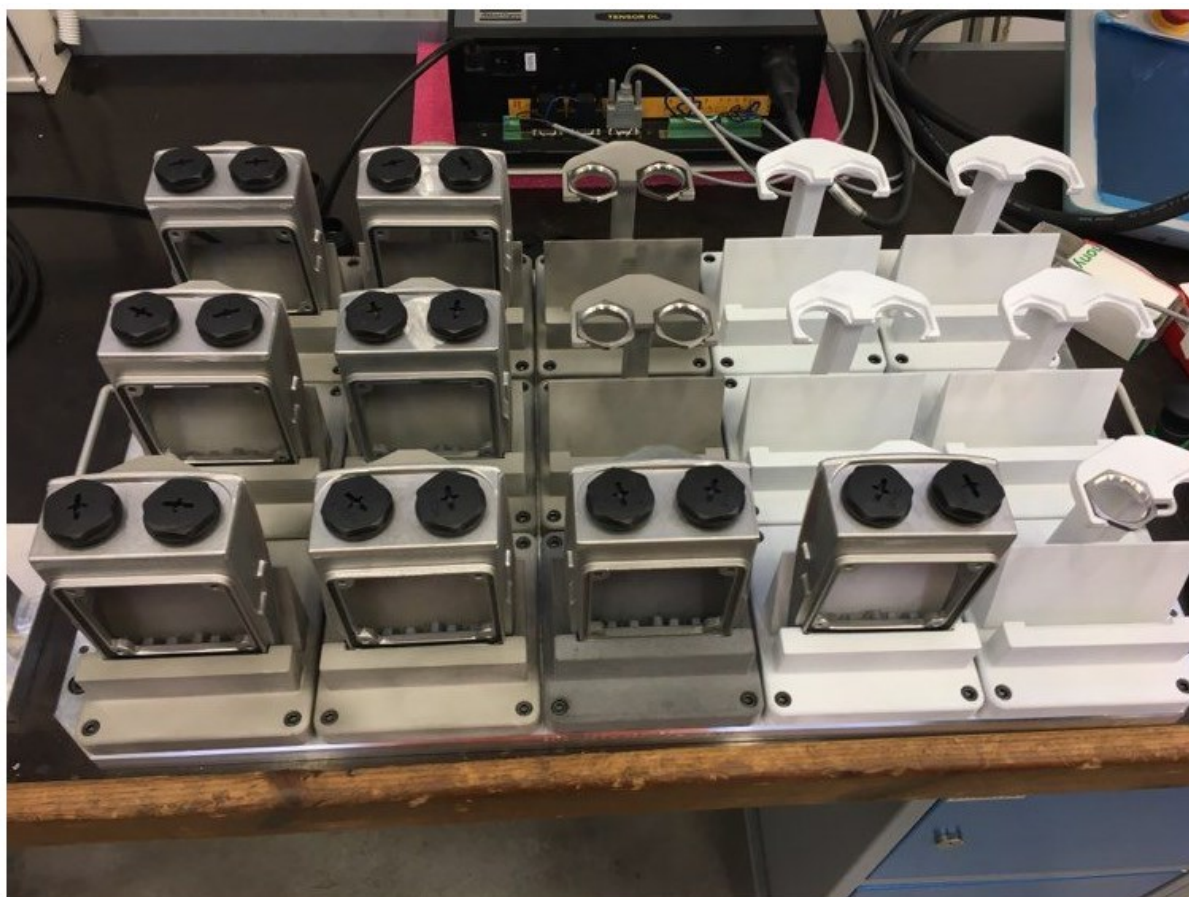
Po ukončení tiskové úlohy byly součásti ochlazeny v post-procesním zařízení a dále povrchově upravovány. Pro další zpracování součásti byla zvolena metoda tryskání, což je post-procesní operace, díky níž získá povrch produktu lepší vlastnosti. Tato metoda se aplikuje před finální povrchovou úpravou například lakováním, galvanickým pokovováním atd. Při této metodě bylo zvoleno jako abrazivum balotina, což jsou skleněné kuličky. Tato metoda byla zvolena kvůli velmi šetrnému tryskání bez poškození součásti.

Tabulka 4 – Složení/informace o složkách balotiny [35]

Složka Prvky klasifikace GHS	% hmotnosti
Produkt:	
Sklo	100
Složky/složení	
Křemen (SiO ₂)	72,5
Oxid sodný	13,7
Oxid vápenatý	9
Oxid hořečnatý	<5
Oxid hlinitý	<2,5
Oxid draselný	<1,5
Oxid železitý	<0,5
Oxid siřičitý	<0,5

3.5 Zhodnocení vytištěných součástí

K vytisknutí bylo zadáno do tiskové úlohy celkově 15 přípravků. Tyto přípravky byly tisknuty po 3 kusech v rozdílných časových obdobích. Z celkových 15 přípravků byl jeden vytisknut externí firmou. Při demontování přípravků z podložky jsme je vizuálně zkontrolovali a poznamenali jsme si pár informací týkající se, ať už viditelných vad nebo možných deformací vzniklých při tisku. Každý vytisknutý přípravek jsme si označili pro lepší orientaci v jejich následném vyhodnocení. Pro lepší představu poznamenané informace shrnu do tabulky, z které budou tyto informace zřejmé. Některé přípravky se liší barevným odstínem. Tato odlišnost je způsobena zpracováním na jiném tryskacím stroji. Bílé přípravky byly tryskány na tryskacím stroji pro 3D tisk. Přípravky se šedým odstínem byly tryskány na pracovišti ve slévárně, z tohoto důvodu mají jiný barevný odstín.



Obrázek 12 – Přípravky připevněné na pracovní podložce

Tabulka 5 – Přehled jednotlivých přípravků

1 A	Tisknut v první polovině října 2019. Čep zůstal v modelu na levé straně, nešel vydělat. Byl tisknut podstavou vzhůru.
1 B	Tisknut v první polovině října 2019. Čep zůstal v desce na levé straně, šel vydělat. Byl tisknut podstavou směrem dolů.
1 C	Tisknut v první polovině října 2019. Čepy zůstaly v modelu, nešly vydělat. Byl tisknut podstavou vzhůru.
2 A	Tisknut v druhé polovině října 2019. Čep zůstal v modelu na levé straně, nešel vydělat. Byl tisknut podstavou vzhůru.
2 B	Tisknut v druhé polovině října 2019. Čep zůstal v desce na levé straně, šel vydělat. Byl tisknut podstavou vzhůru.
2 C	Tisknut v druhé polovině října 2019. Čep zůstal v desce, šel vydělat. Byl tisknut podstavou směrem dolů.
3 A	Tisknut v první polovině listopadu 2019. Čep zůstal v modelu, šel vydělat. Byl tisknut podstavou vzhůru.
3 B	Tisknut v první polovině listopadu 2019. Čep zůstal v desce. Byl tisknut podstavou vzhůru.
4 A	Tisknut v druhé polovině listopadu 2019. Čep zůstal v modelu na pravé straně, nešel vydělat ven. Byl tisknut podstavou vzhůru.
4 B	Tisknut v druhé polovině listopadu 2019. Čep zůstal v desce, šel vydělat. Byl tisknut podstavou vzhůru.
4 C	Tisknut v druhé polovině listopadu 2019. Čep zůstal v desce. Byl tisknut podstavou směrem dolů.
5 A	Tisknut v první polovině prosince 2019. Čep zůstal v desce. Byl tisknut podstavou vzhůru.
5 B	Tisknut v první polovině prosince 2019. Čep zůstal v modelu na levé straně, nešel vydělat. Byl tisknut podstavou vzhůru.
5 C	Tisknut v první polovině prosince 2019. Čep zůstal v modelu na levé straně, nešel vydělat. Byl tisknut podstavou směrem dolů.
X	Tisknut externí firmou v první polovině září 2019. Ve funkčních plochách mírně poškozený. Čep zůstal v modelu, šel vydělat. Jiný barevný odstín a povrch.

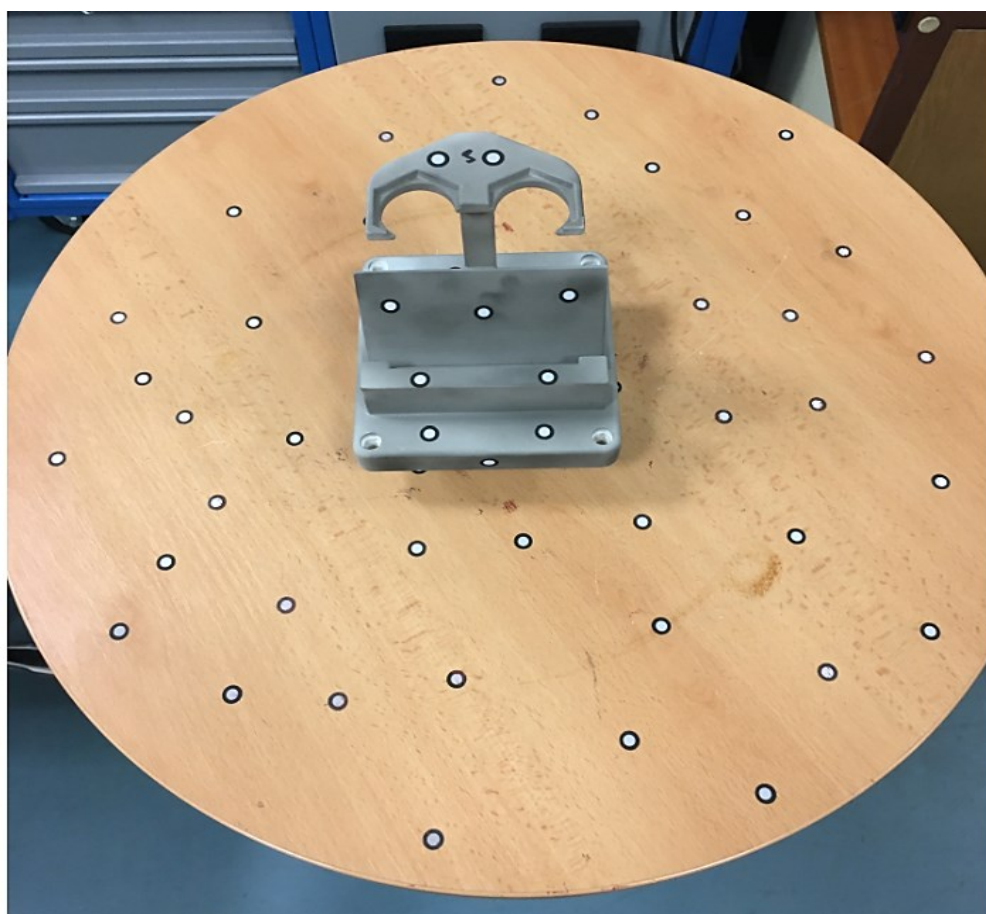
3.6 Skenování přípravků

Po zaznamenání výše uvedených informací a označení jednotlivých kusů jsem mohl již zahájit další úkon, kterým bylo skenování vytištěných přípravků do softwaru počítače. Díky tomu jsem mohl zjistit a vyhodnotit parametry týkající se jejich rozměrové přesnosti. Na základě tohoto vyhodnocení jsme dále schopni zjistit možnou příčinu vzniku těchto nepřesností. Samotné skenování bylo prováděno na klimatizovaném pracovišti, kde byla udržována konstantní teplota. K dispozici jsem měl skener PreciSCAN X335, pomocí kterého jsem realizoval tento pracovní úkon. Naskenované modely byly dále upravovány v programu Scan viewer dle požadavků na jejich další vyhodnocení.



Obrázek 13 – Měřicí pracoviště

Před zahájením skenování bylo nutné každý přípravek k tomuto úkonu připravit. Tato příprava se týkala jejich polepení takzvanými markery (referenčními body). Na základě těchto bodů je skener schopný vykreslit 3D model součásti. Polepení se netýkalo pouze přípravků, ale i stolu, na kterém byly tyto přípravky skenovány. Na přípravcích, kde bylo málo těchto bodů nebyl skener schopen vykreslit kompletní model. Z poznatků ze skenování je lepší polepit modely větším množstvím těchto bodů, aby si je skener mohl následně načíst a pracovat s nimi a zamezili jsme tak problémům s jeho orientací v souřadném systému. Po těchto úpravách byl zahájen samotný proces skenování.



Obrázek 14 – Příprava součásti ke skenování

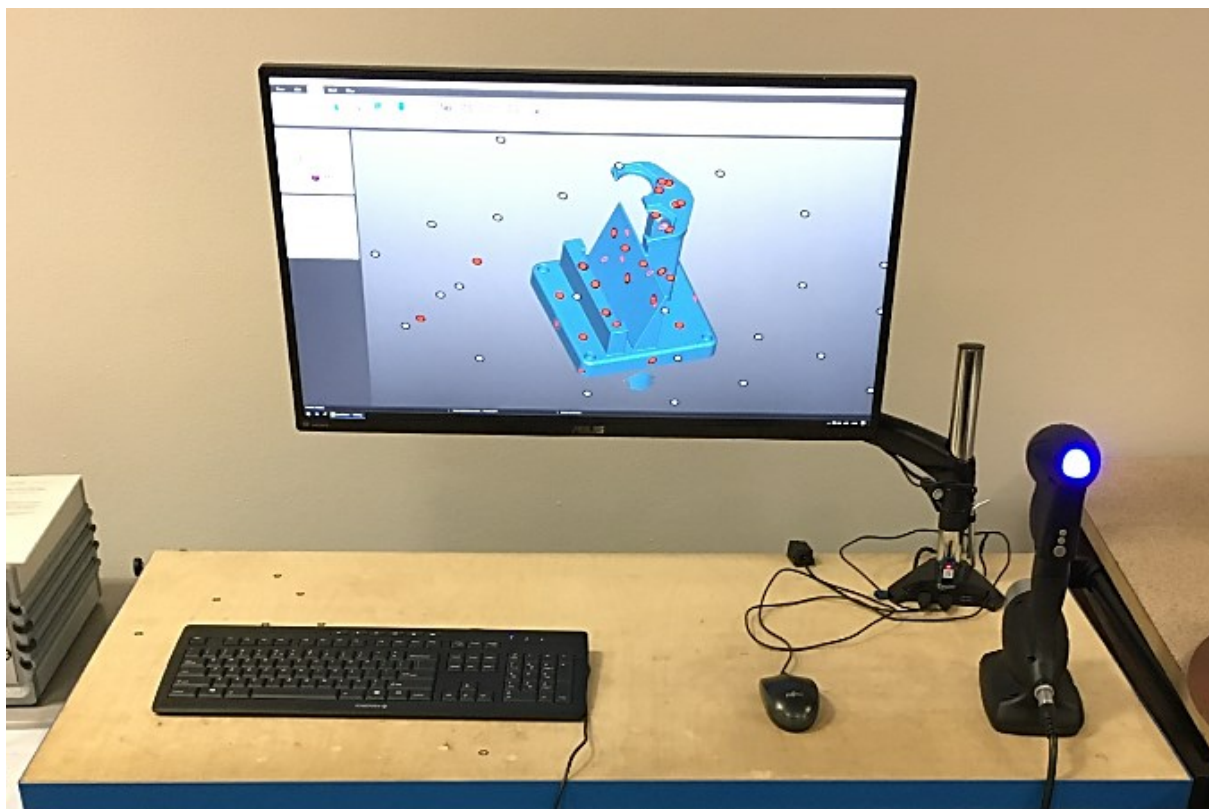
V první řadě bylo potřeba naskenovat referenční body přilepené na stole, na kterém probíhalo skenování přípravků. Pomocí těchto bodů jsme si mohli v programu Scan viewer nastavit základnu, díky které se skener mohl dále orientovat. Při skenování skener zachytil veškeré tyto body bez výjimky nalepených bodů na stole, což nám stěžovalo následnou úpravu v programu, kdy delší dobu trvalo jejich vyříznutí. Pro usnadnění těchto úprav jsem si skenovaný přípravek vypodložil a oddělil tím nastavenou základnu a skenovaný přípravek. Tímto vznikla mezi skenovaným přípravkem a základnou mezera rovná výšce vypodložení a mohl jsem tak v programu jednoduše vyříznout prvky, které nebyly potřebné a zůstal tak pouze čistě naskenovaný model.

Nyní jsem již mohl začít skenovat vytištěný přípravek. Pomocí softwaru Scan Viewer se na monitoru zobrazoval dosavadní postup skenované součásti, díky kterému bylo možné sledovat místa, která je potřeba upravit. Tato možnost, tak zjednodušila skenování menších ploch, které bylo potřeba příslušně přiblížit. Pro kompletní naskenování celé součásti ji bylo nutné skenovat na dvakrát. Nejdříve byla naskenována horní část. Po naskenování horní části se součást otočila a pokračovalo se ve skenování spodní části. Aby bylo možné součást otočit a naskenovat potřebné plochy museli se provést softwarové změny v programu. Tyto změny se týkali nového nastavení základny. Pro její nové nastavení bylo potřeba smazat dosavadně používanou základnu a pomocí skeneru načíst nové mračno referenčních bodů, díky kterým bylo možné nastavit novou základnu. Po nastavení nové základny se již mohlo zahájit skenování spodní části. V první řadě bylo potřeba načíst body používané pro skenování horní části, díky kterým se mohl skener orientovat a poznal tak, že jsme součást otočili. Při tomto kroku se stávalo, že skener odmítal načíst plochu, kterou bylo potřeba skenovat. Z tohoto důvodu bylo potřeba nalepit na součást více referenčních bodů.

Při skenování přípravků byl výhodou jejich matný povrch, díky kterému bylo možné tyto přípravky bez problémů naskenovat. Problém však nastal při skenování originálního kovového modelu. I navzdory změně režimu skeneru nebylo možné díky odleskům tohoto materiálu vyhotovit zcela kompletní model. Avšak i toto naskenované mračno bodů stačilo pro jejich následné vyhodnocení.

Skenování bylo poměrně dost časově náročné. Naskenování jednoho modelu trvalo přibližně 30 minut. Při skenování se také vyskytlo pár technických problémů. Po naskenování určitého množství přípravků, většinou dvou až tří, skener přestal pracovat a bylo nutné restartovat celý počítač. Díky tomu se párkrát přišlo o již kompletně naskenované přípravky

a celková doba skenování se tak prodloužila. Navzdory těmto menším problémům celé skenování probíhalo poměrně dobře.



Obrázek 15 – Ukázka naskenovaného přípravku v programu Scan Viewer

3.7 3D skener pro experiment

3.7.1 Charakteristika skeneru PreciSCAN X335

Princip spočívá v promítání laserových křížů na skenovaný objekt, na kterém se dopadající paprsky deformují dle křivosti povrchu. Tyto deformace jsou snímány dvěma velmi rychlými obrazovými snímači a pomocí triangulační metody se pak automaticky vypočítává 3D model skenovaného objektu. Množství laserových křížů je závislé na rychlosti, detailnosti a preciznosti skenování. Vyznačuje se vysokou mobilitou a rychlostí sběru dat. Systém pracuje s mobilním počítačem, na kterém se zadávají parametry skenování jako je rozlišení a informace o materiálu skenovaného objektu.

K orientaci v prostoru skenery využívají takzvané markery, které se rozmísťují v oblasti skenovaného dílu. Pokud je to možné lze je rozmístit a nalepit přímo na díl. Základní software, který se dodává ke skeneru umožňuje exportovat data jako mračno prostorových bodů nebo vytvořit polygonovou síť. Samozřejmostí jsou funkce k editaci 3D dat, jejich čištění, redukci šumových bodů a spojování jednotlivých skenů. [28]



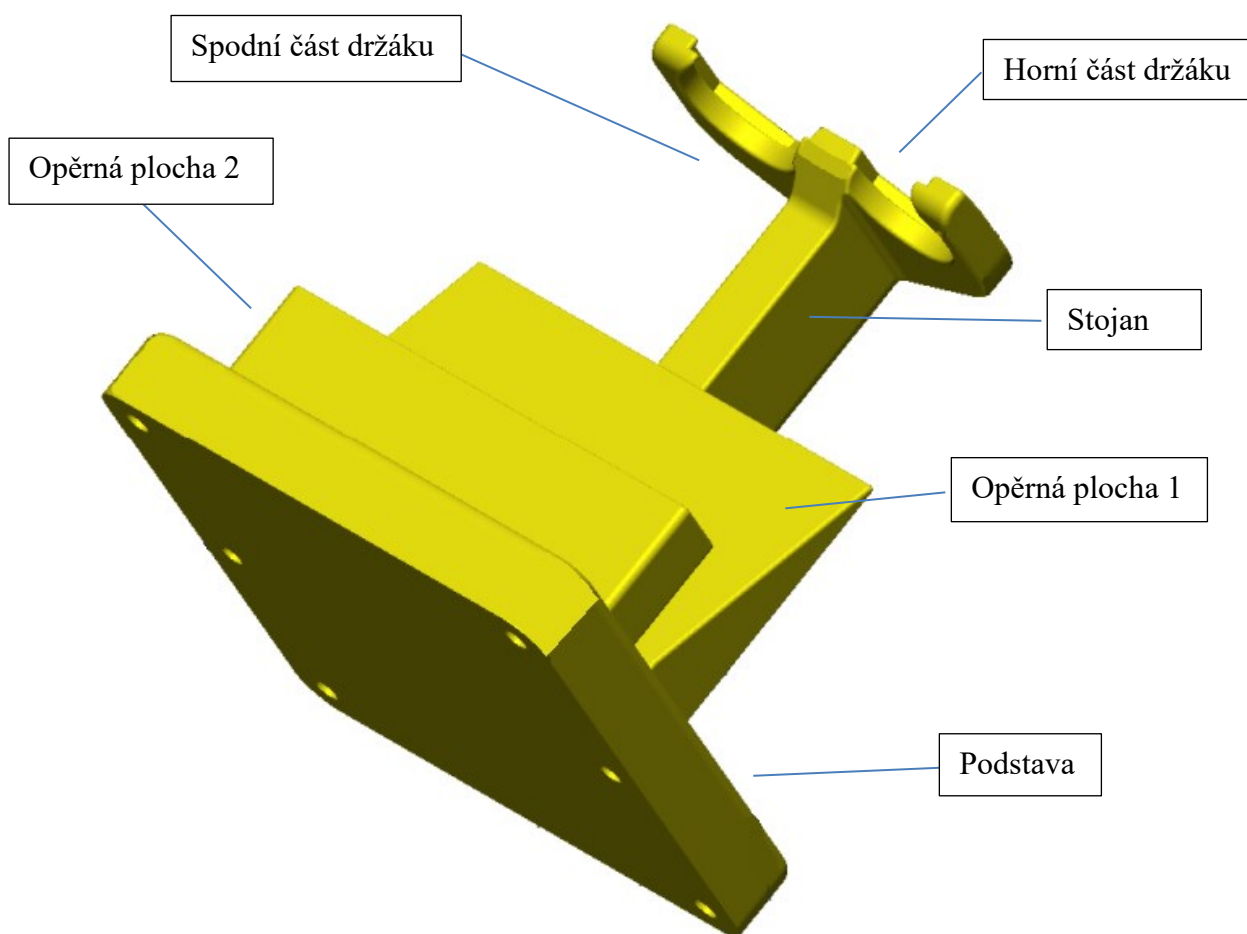
Obrázek 16 – Skener PreciScan x335, převzato z [29]

Tabulka 6 – Parametry skeneru PreciScan x335

Mód skeneru	Standardní mód	Hypermód
Snímání	3x laserový kříž + 1x extra laserová linka	5 modrých paralelních laserových linek
Rozlišení	0,05 mm	0,02 mm
Přesnost	0,03 mm	
Rychlost snímání	265.000 bodů / s	320.000 bodů / s
Třída laseru	Laser II. Třídy očím bezpečný	
Objemová přesnost	0,02 + 0,08 mm/m	0,01 + 0,08 mm/m
Objemová přesnost s PreciSCAN FTGM	0,02 + 0,025 mm/m	0,01 + 0,025 mm/m
Měřicí vzdálenost	300	150
Hloubka ostrosti	250	100
Efektivní měřicí vzdálenost	200–450 mm	100–200 mm
Velikost	315x 165x 105 mm	
Komunikace s PC	LAN	
Výstupní formáty	*.ply, *.xyz, *.dae, *.fbx, *.ma, *.obj, *.asc, *.stl, na vyžádání uživatelský	
Pracovní teplotní rozsah	-10 až 40 °C	
Ovládací program	Součástí systému je software pro ovládání skeneru, sběr 3D dat, základní zpracování a přípravu na další zpracování.	

3.8 Vyhodnocení odchylek součástí

Po naskenování všech přípravků bylo zahájeno vyhodnocování a mohli se zjistit vzniklé odchylky jednotlivých přípravků. Vyhodnocování bylo prováděno v programu Geomagic Control X. Pro správnost výsledků bylo nutné naskenované přípravky programově upravit. Úpravy se týkaly především zlepšení přesnosti, filtrování šumu a vyplnění nedokonalé naskenovaných částí přípravků pomocí triangulace. Dále byl importován do programu originální přípravek, ten byl nastaven jako referenční. Dle něj se zjišťovali vzniklé odchylky. Na záznamech z vyhodnocení je tento referenční model importován s již zhotoveným zaoblením. Námi skenovaný originální model byl jeho předchůdcem a je vyrobený bez tohoto zaoblení. Z tohoto důvodu se na jeho hranách vyskytují velké odchylky. Výsledky vyhodnocení shrnu do dvou tabulek. V první budou slovně popsány odchylky jednotlivých přípravků, které byly viditelné dle naskenovaných součástí a v druhé budou již přesné odchylky vyhodnocené pomocí programu Geomagic Control X.



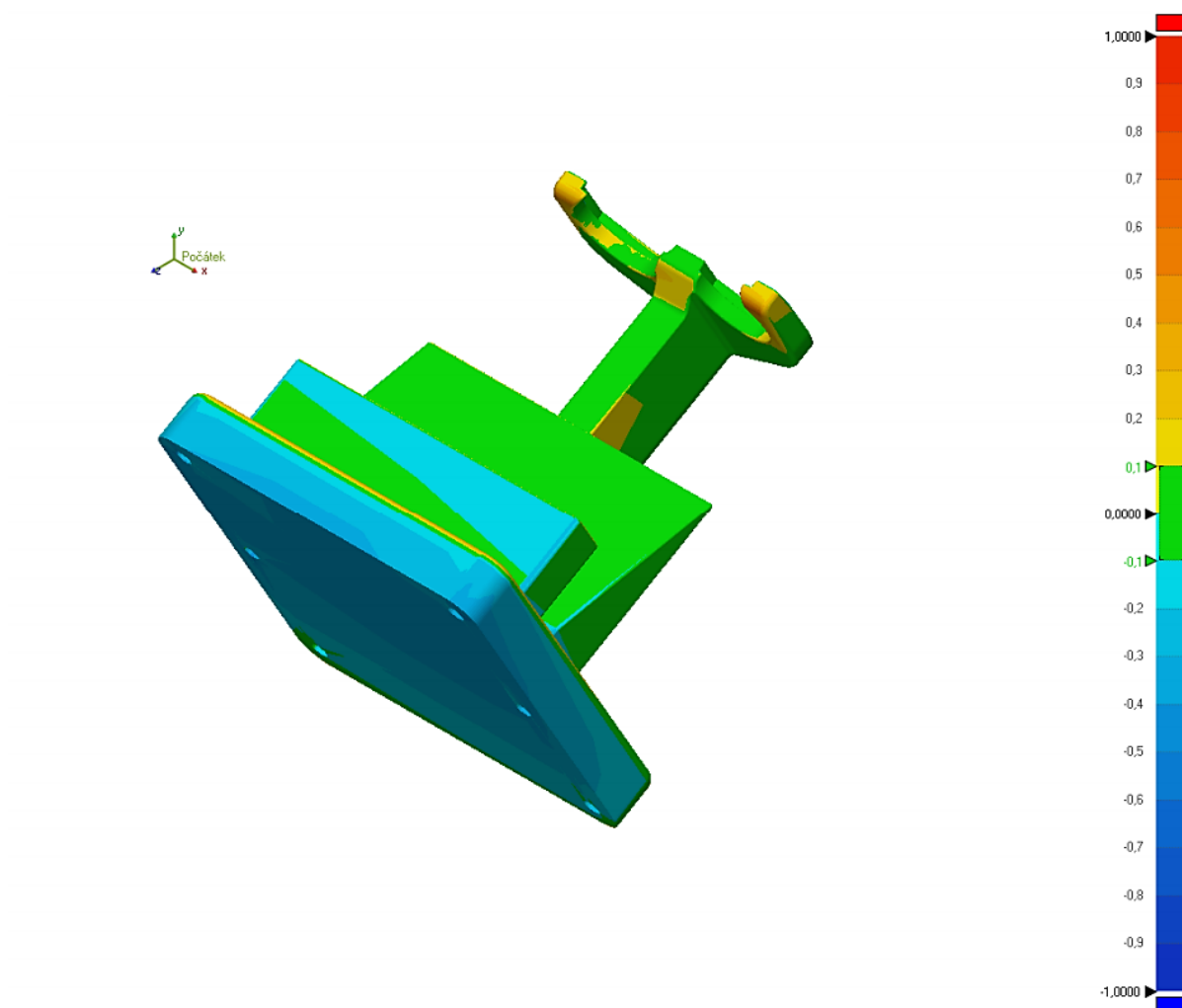
Obrázek 17 – Popis ploch přípravku pro slovní vyhodnocení

Tabulka 7 – Zhodnocení odchylek jednotlivých přípravků

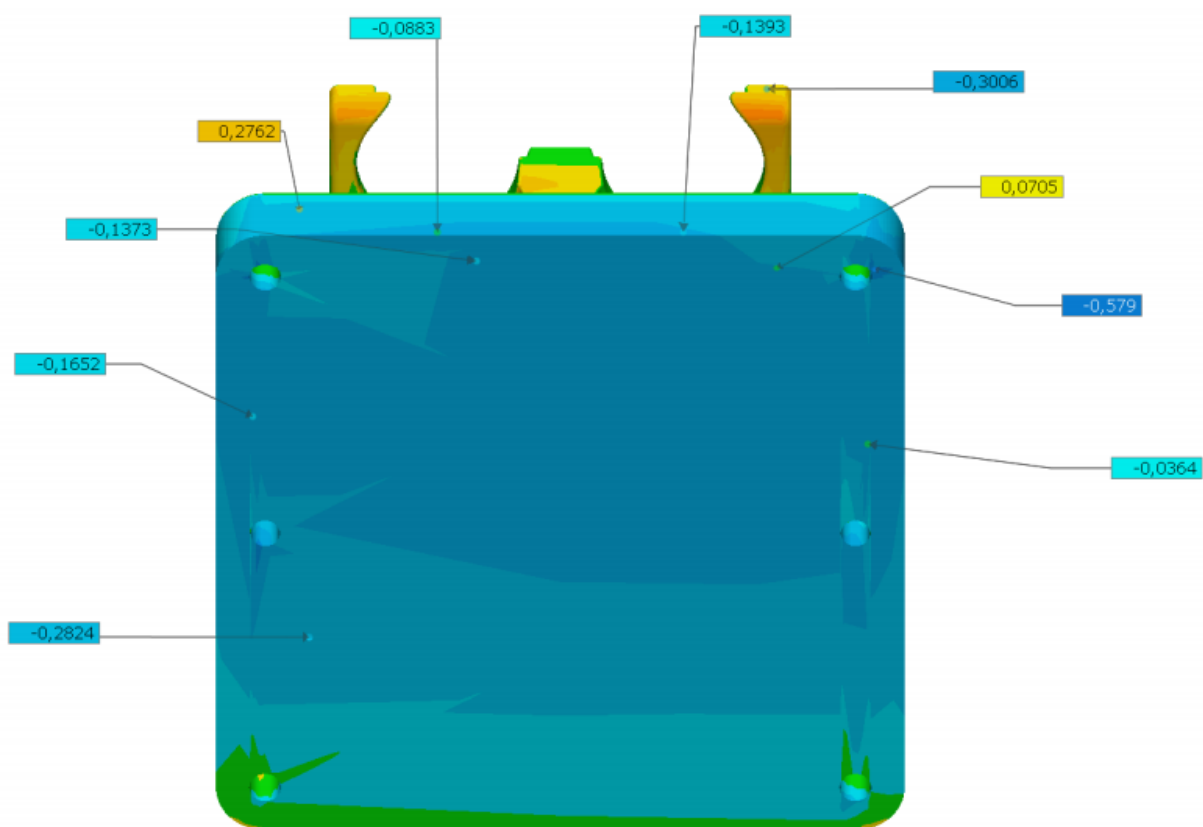
1 A	Spodní část podstavy, levá polovina horní části držáku, přední strana opěrné plochy 2, levá a přední strana boční části podstavy přesah. Levá polovina spodní části držáku, levá přední strana horní části podstavy, přední strana stojanu pod hranicí minimální tolerance.
1 B	Spodní část podstavy, horní část držáku, levá a pravá strana opěrné plochy 1,2, levá a přední strana boční části podstavy pod hranicí minimální tolerance.
1 C	Spodní část podstavy, horní část držáku, pravá přední strana horní části podstavy, levá strana boční části podstavy přesah. Zadní strana horní části podstavy, opěrná plocha 1, přední část stojanu pod hranicí minimální tolerance.
2 A	Pravá přední strana spodní části podstavy, levá strana horní části podstavy, horní část držáku, přední část opěrné plochy 1,2, přední strana boční části podstavy pod hranicí minimální tolerance. Levá zadní strana spodní části podstavy, pravá přední strana horní části podstavy, pravá polovina spodní části držáku přesah.
2 B	Spodní část podstavy, horní část držáku, pravá zadní strana horní části podstavy, levá a přední strana opěrné plochy 1,2, levá a přední strana boční části podstavy, přední strana stojanu pod hranicí minimální tolerance. Levá přední strana horní části podstavy, levá polovina horní části opěrné plochy 2 přesah.
2 C	Spodní část podstavy, horní část držáku, levá strana opěrné plochy 1,2, levá a přední strana boční části podstavy pod hranicí minimální tolerance. Přední strana horní části podstavy, spodní část držáku přesah.
3 A	Spodní část podstavy, horní část držáku, levá zadní strana horní části podstavy, přední a pravá strana opěrné plochy 1,2, přední strana boční části podstavy pod hranicí minimální tolerance. Pravá přední strana horní části podstavy, spodní část držáku, levá strana a pravá polovina horní části opěrné plochy 2 přesah.
3 B	Spodní část podstavy, horní část držáku, pravá zadní strana horní části podstavy, levá a přední část opěrné plochy 1,2, levá a přední strana boční části podstavy, přední strana stojanu pod hranicí minimální tolerance. Levá přední strana horní části podstavy, spodní část držáku, levá polovina horní části opěrné plochy 2 přesah.

4 A	Spodní část podstavky, horní část držáku, levá zadní strana horní části podstavky, přední a pravá strana opěrné plochy 1,2, přední strana boční části podstavky, přední strana stojanu pod hranicí minimální tolerance. Pravá přední strana horní části podstavky, pravá polovina horní části opěrné plochy 2 přesah.
4 B	Spodní část podstavky, horní část držáku, levá zadní strana horní části podstavky, přední a pravá strana opěrné plochy 1,2 přední strana boční části podstavky pod hranicí minimální tolerance. Pravá přední strana horní části podstavky, levá strana a pravá polovina horní části opěrné plochy 2 přesah.
4 C	Spodní část podstavky, pravá polovina horní části držáku, zadní strana horní části podstavky, levá strana opěrné plochy 1, levá strana boční části podstavky pod hranicí minimální tolerance.
5 A	Spodní část podstavky, horní část držáku, pravá zadní strana horní části podstavky, levá a přední strana opěrné plochy 1,2, levá a přední strana boční části podstavky, přední strana stojanu pod hranicí minimální tolerance. Přední strana a levá strana horní části podstavky, levá polovina horní části opěrné plochy 2 přesah.
5 B	Spodní část podstavky, horní část držáku, levá a přední strana opěrné plochy 1,2, pravá zadní strana horní části podstavky, levá a přední strana boční části podstavky, přední strana stojanu pod hranicí minimální tolerance. Levá přední strana horní části podstavky přesah.
5 C	Spodní část podstavky, zadní strana horní části podstavky, levá strana opěrné plochy 1,2, levá a přední strana boční části podstavky pod hranicí minimální tolerance.
X	Spodní část podstavky, horní část držáku, přední strana opěrné plochy 2, levá a přední strana boční části podstavky pod hranicí minimální tolerance. Levá zadní strana horní části podstavky, horní část opěrné plochy 2 přesah.
O	Spodní část podstavky, horní část držáku, na horní části podstavky kolem otvorů místy přesah. Spodní část držáku, levá a pravá strana opěrné plochy 2, přední část stojanu pod hranicí minimální tolerance.

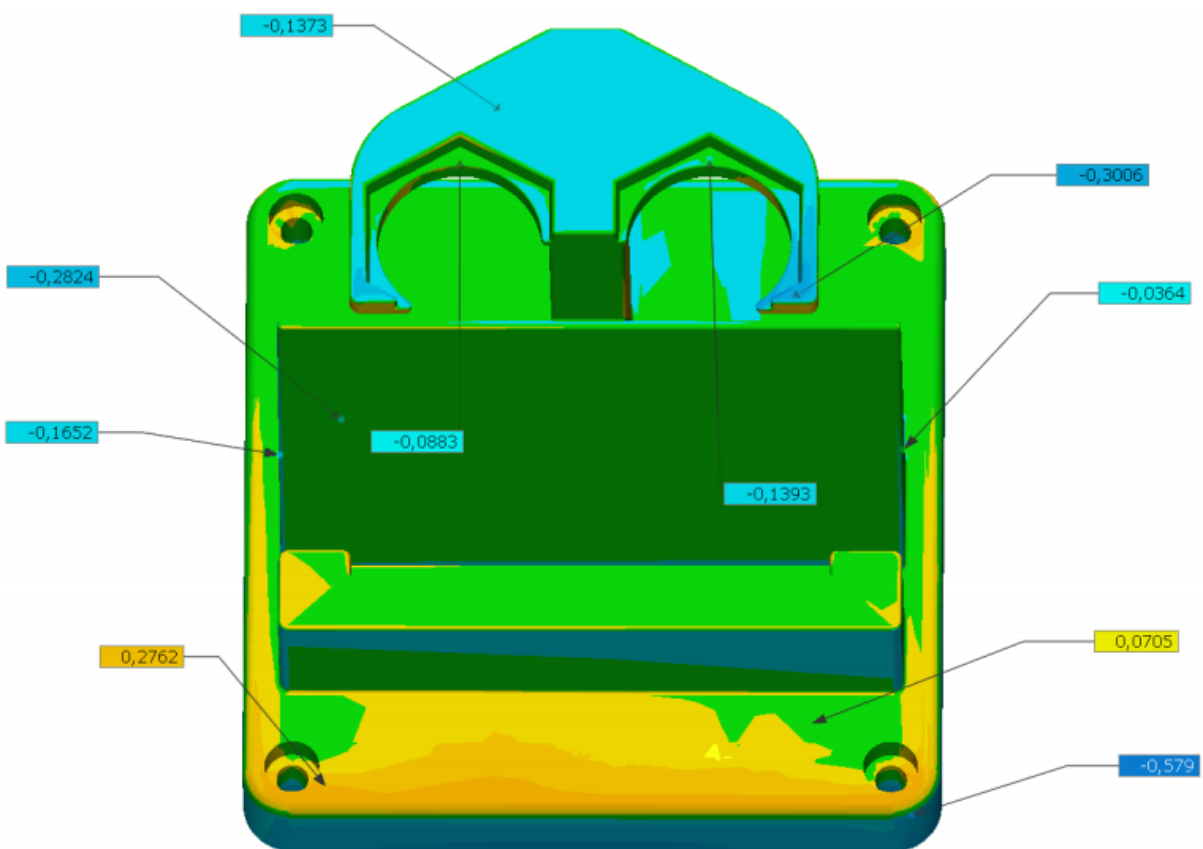
3.8.1 Vyhodnocení nejlépe vytisknutého modelu ve firmě SIEMENS



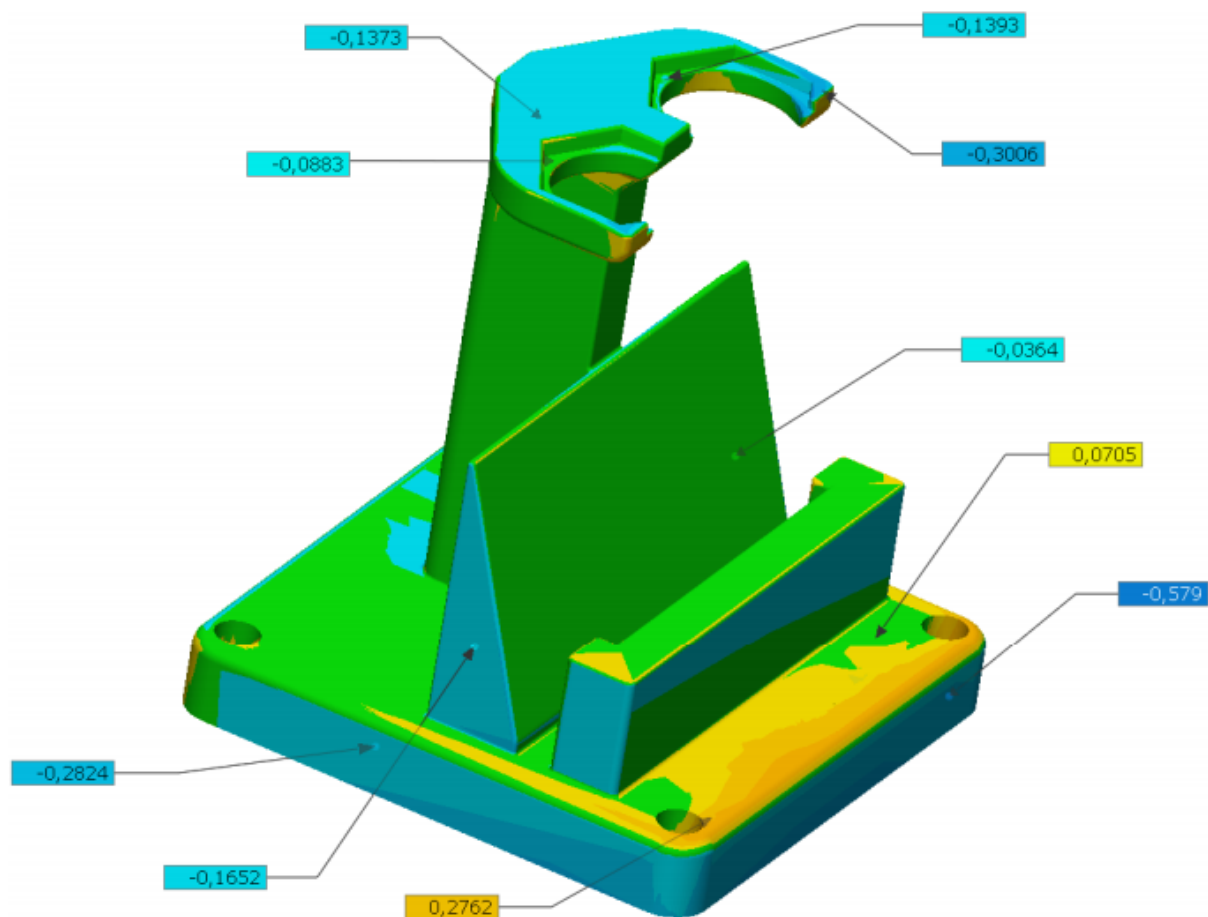
Obrázek 18 – Porovnání s referenčním modelem



Obrázek 19 – Pohled na spodní část přípravku

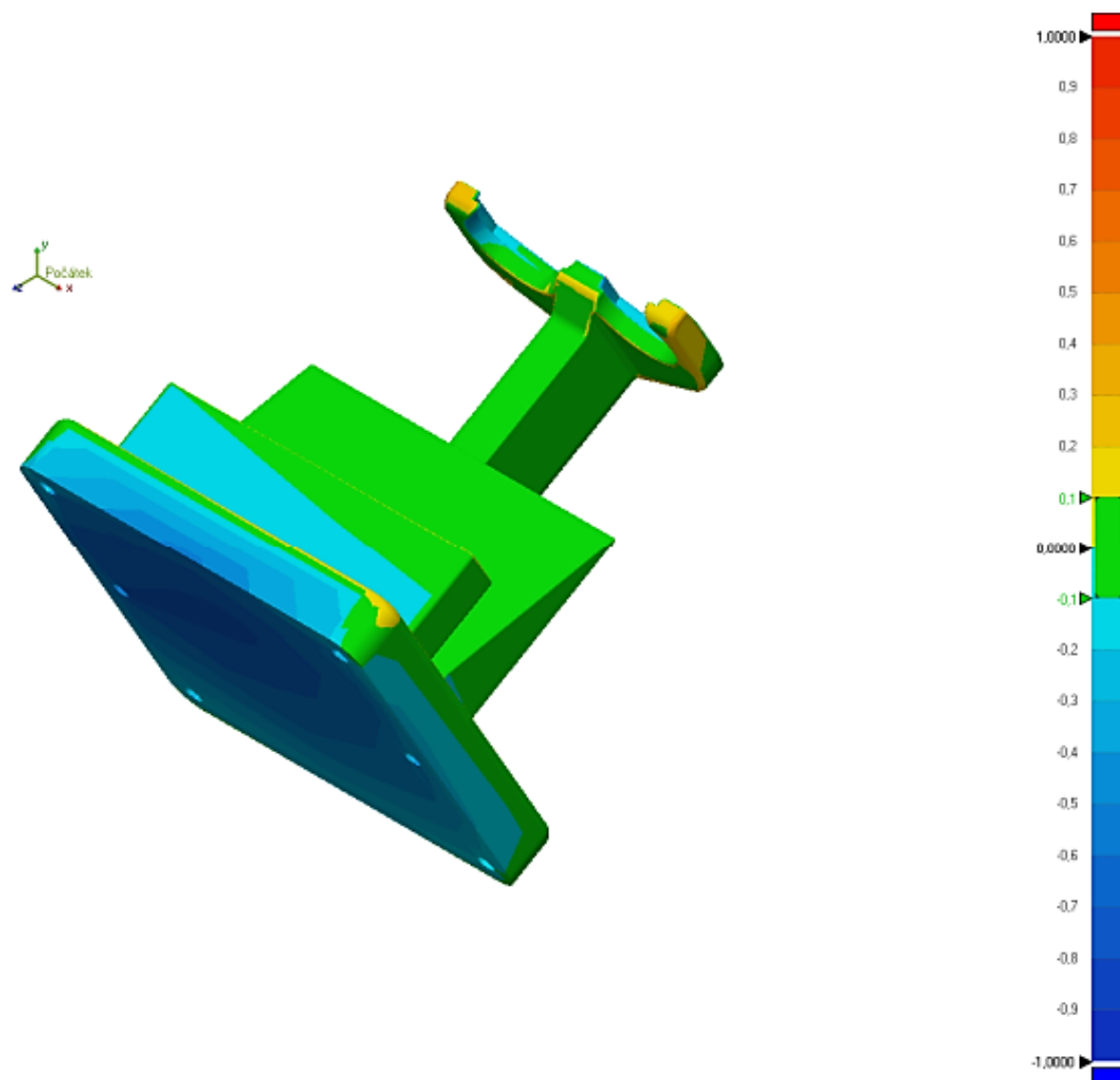


Obrázek 20 – Pohled na horní část přípravku

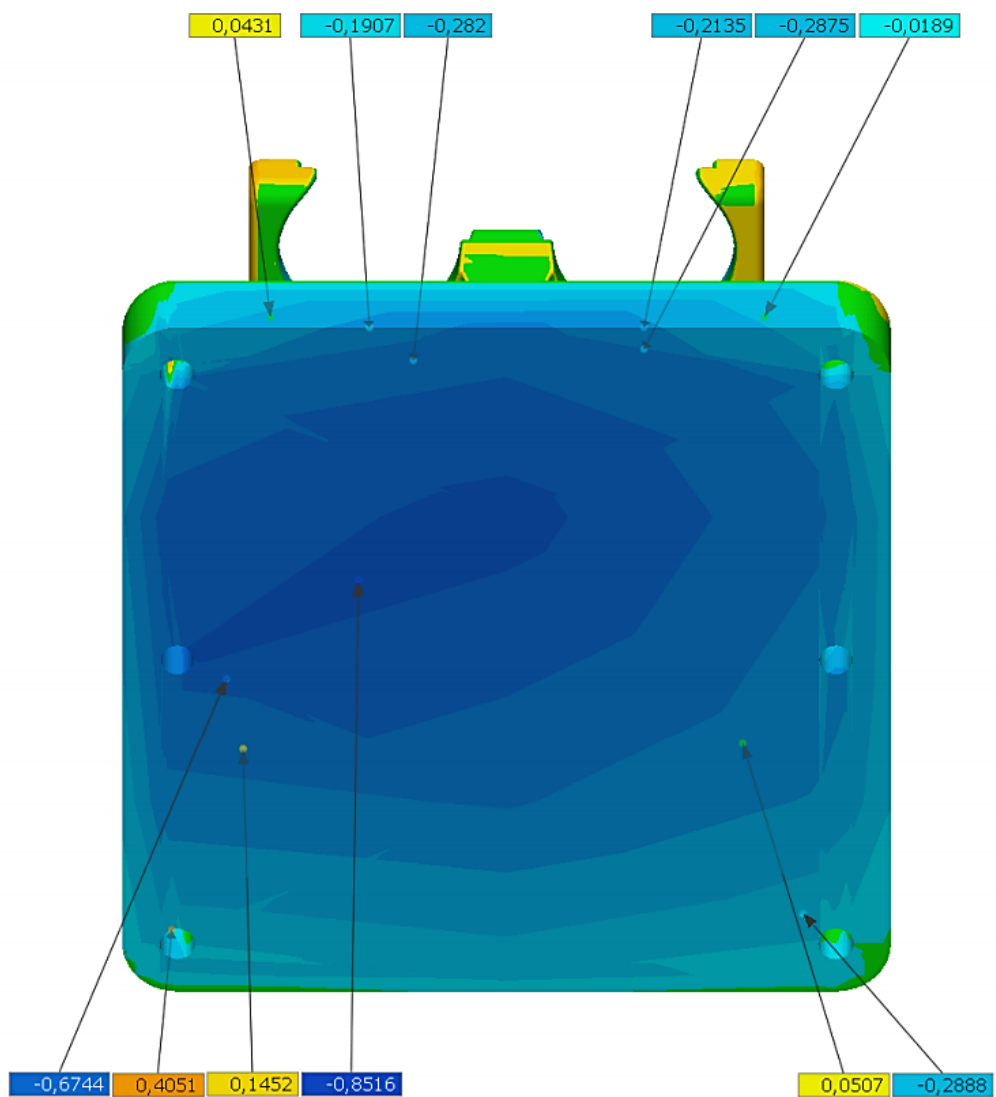


Obrázek 21 – Celkový pohled

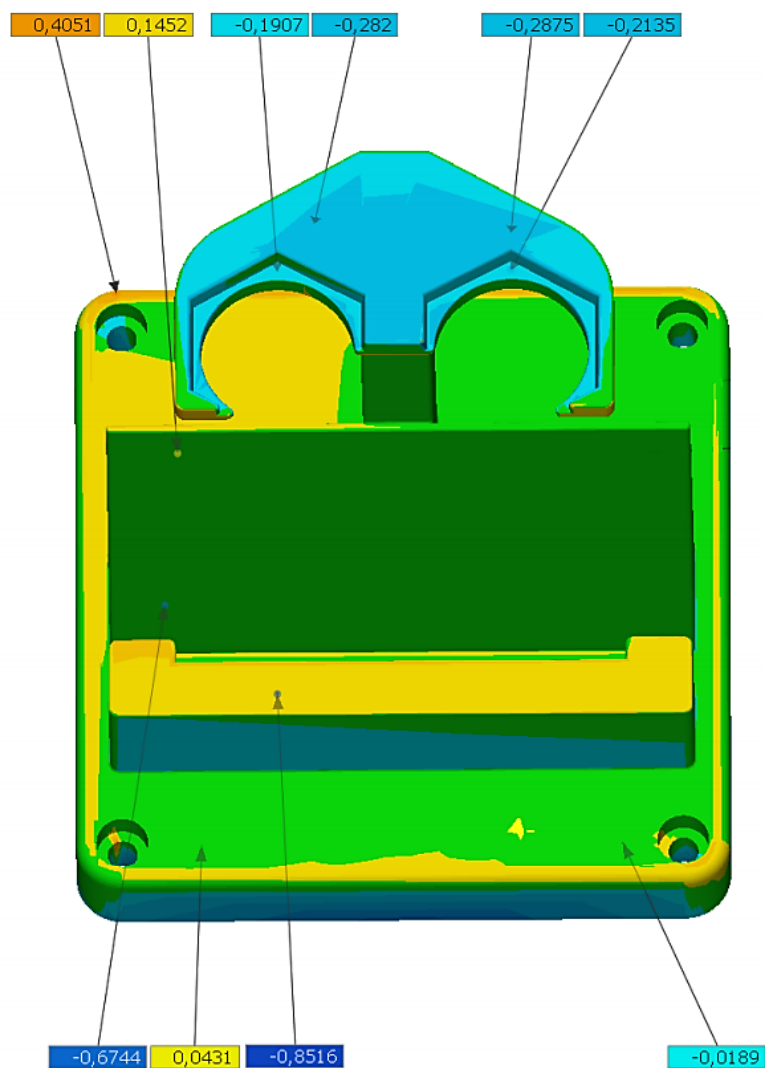
3.8.2 Vyhodnocení přípravku tisknutého externí firmou



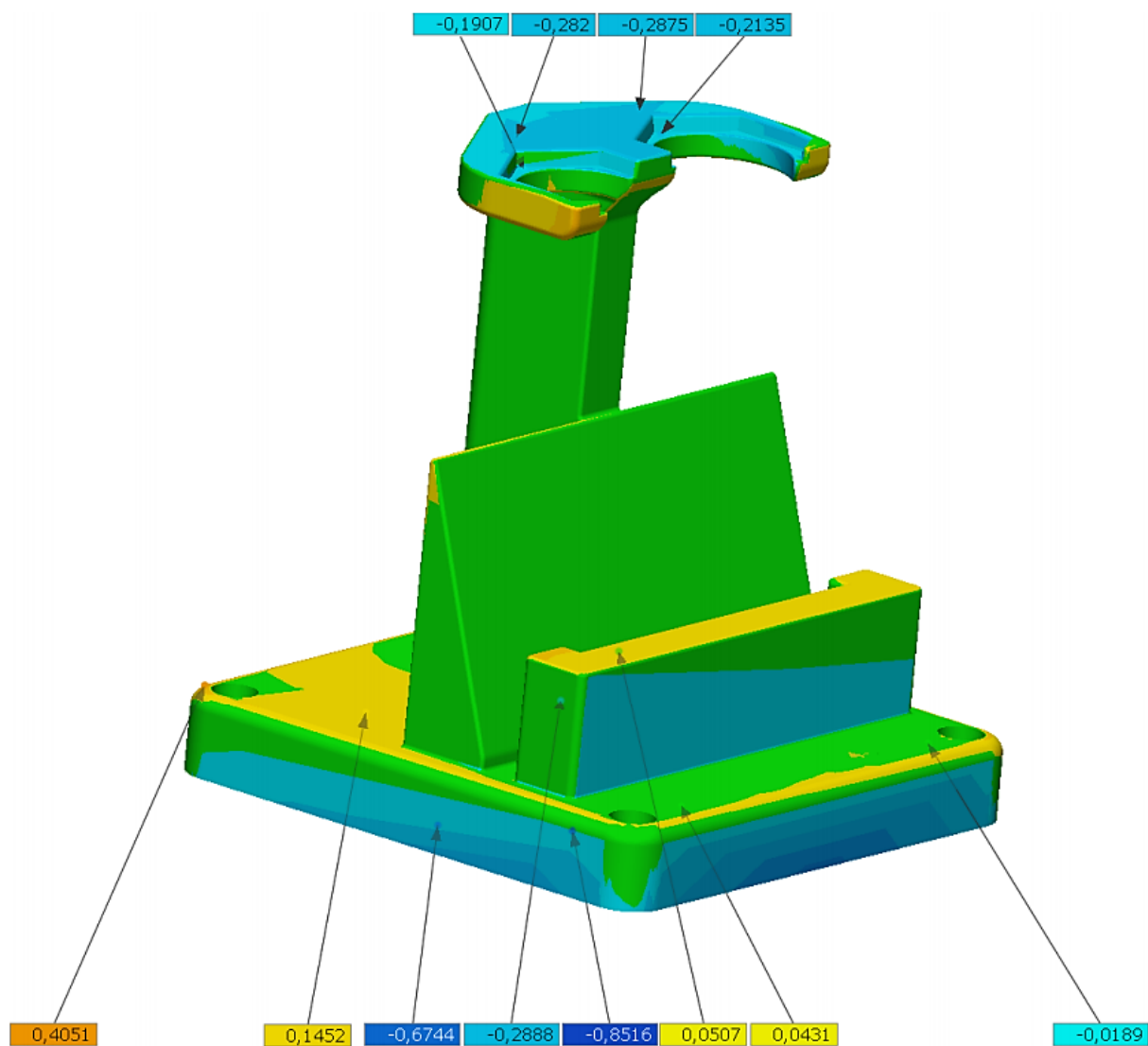
Obrázek 22 – Porovnání s referenčním modelem



Obrázek 23 – Pohled na spodní část přípravku

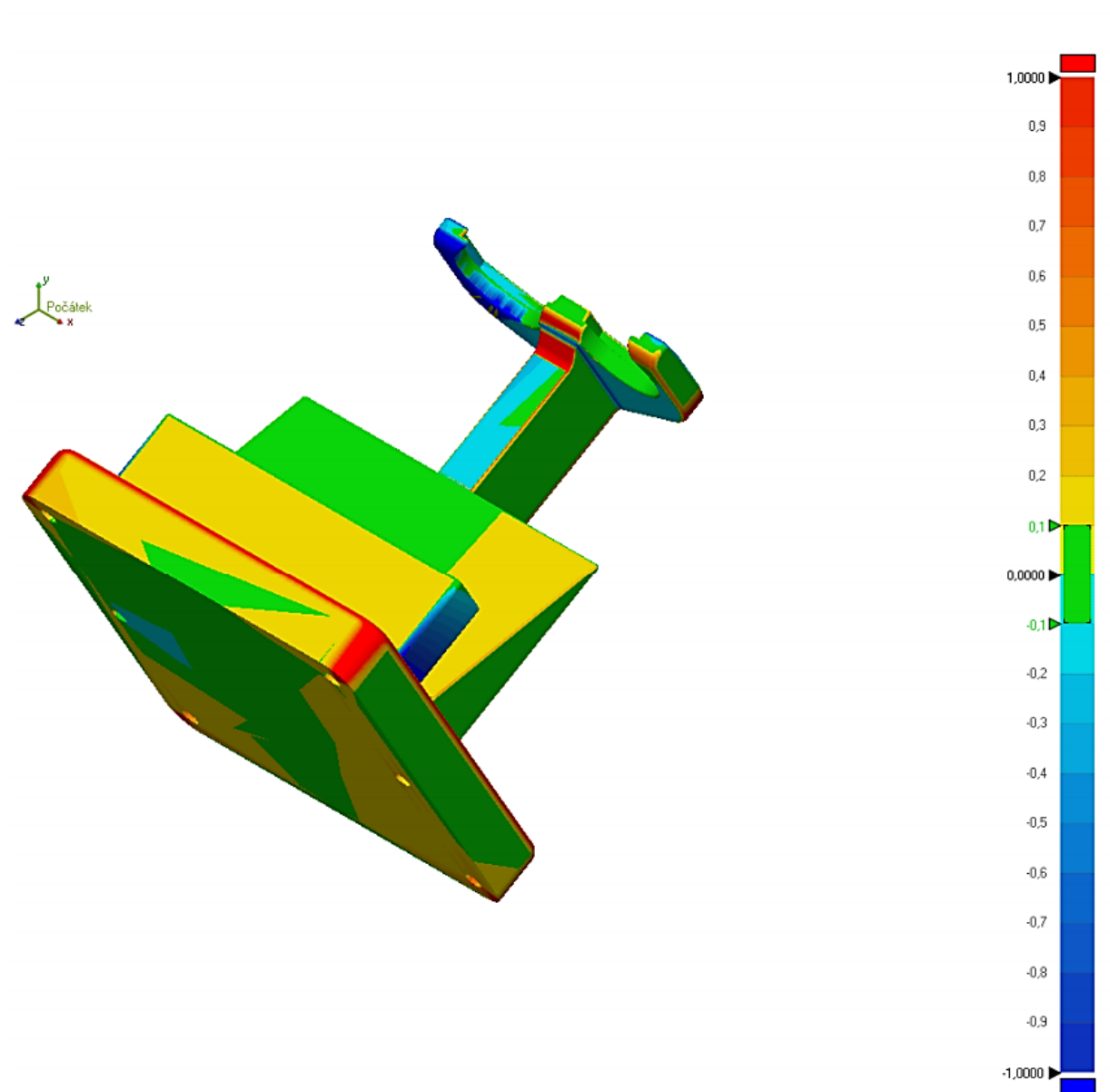


Obrázek 24 – Pohled na horní část přípravku

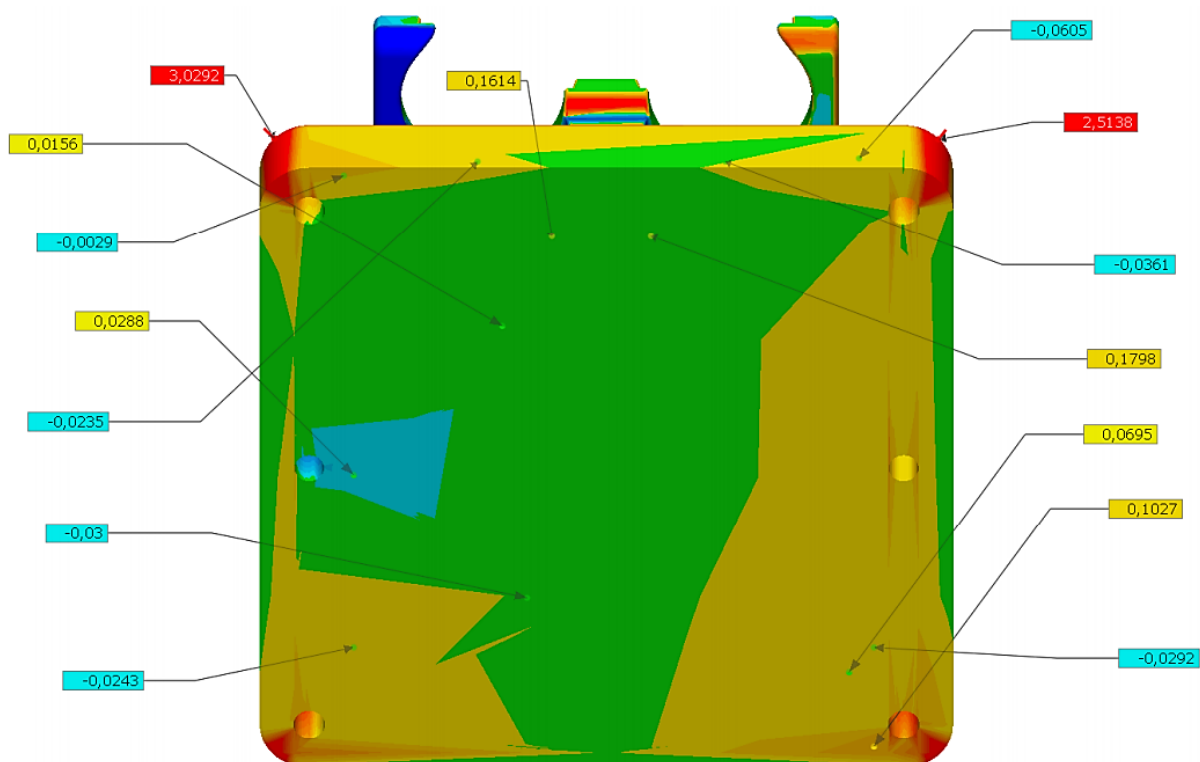


Obrázek 25 – Celkový pohled

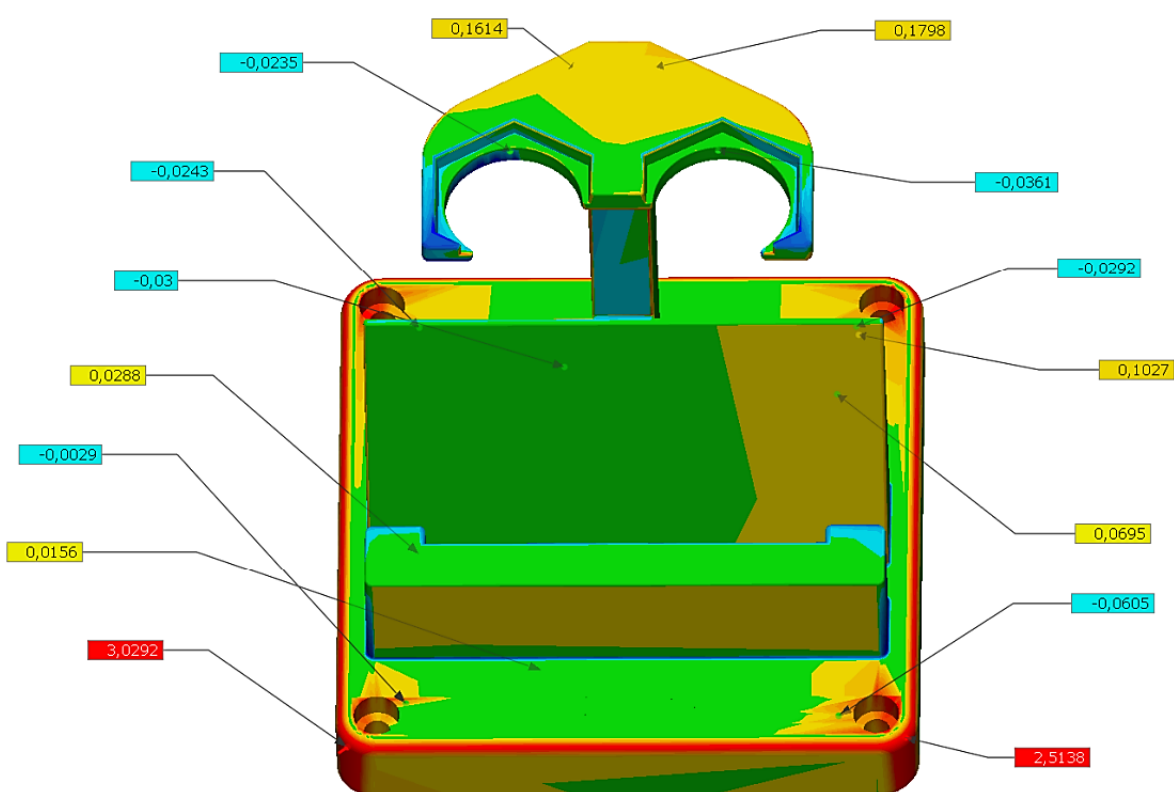
3.8.3 Vyhodnocení originálního přípravku vyrobeného obráběním



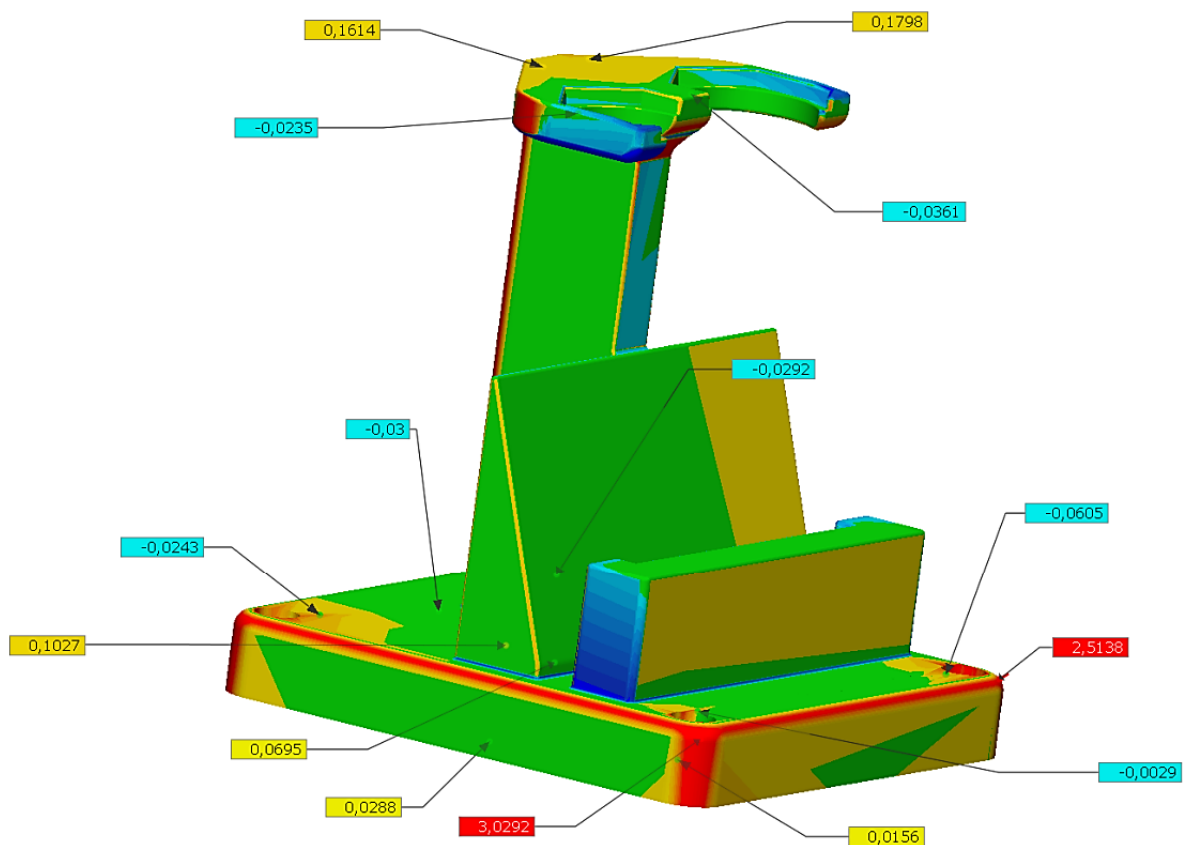
Obrázek 26 – Porovnání s referenčním modelem



Obrázek 27 – Pohled na spodní část přípravku



Obrázek 28 – Pohled na horní část přípravku



Obrázek 29 – Celkový pohled

Tabulka 8 – Tabulka shrnutí odchylek jednotlivých přípravků

	Min. odchylka (mm)	Max. odchylka (mm)	Prům. odchylka (mm)	+Prům. odchylka (mm)	-Prům. odchylka (mm)	V Toleranci (%)	Mimo Toleranci (%)
1 A	-0,7338	0,7430	0,08	0,1662	-0,0948	43,736	56,264
1 B	-0,7131	0,7117	-0,0728	0,0928	-0,1517	49,4985	50,5015
1 C	-0,9392	0,8453	0,0721	0,2044	-0,1499	37,6875	62,3125
2 A	-1,455	1,4501	-0,0589	0,2495	-0,3052	17,789	82,211
2 B	-0,9972	0,8218	-0,0752	0,1873	-0,2727	24,3455	75,6545
2 C	-0,7552	0,7866	-0,0298	0,1229	-0,1694	46,9448	53,0552
3 A	-1,1275	0,8657	-0,0873	0,2015	-0,329	22,3521	77,6479
3 B	-1,1953	1,0622	-0,0827	0,2027	-0,3084	23,6226	76,3774
4 A	-1,0606	1,2965	-0,1169	0,1727	-0,2926	26,5812	73,4188
4 B	-1,1506	1,3119	-0,0752	0,1909	-0,2962	24,6718	75,3282
4 C	-0,6776	0,6230	-0,1025	0,0818	-0,1564	41,8208	58,1792
5 A	-1,1379	0,8586	-0,0850	0,1835	-0,2928	26,0444	73,9556
5 B	-1,1827	0,8109	-0,1157	0,1835	-0,3124	24,5796	75,4204
5 C	-0,6524	0,5654	-0,0932	0,0702	-0,1502	47,5624	52,4379
X	-1,3601	1,4686	-0,1092	0,0816	-0,2769	54,7256	45,2744
O	-3,2792	3,2785	0,1114	0,2994	-0,3246	56,9275	43,0725

X – Přípravek vytisknutý externí firmou

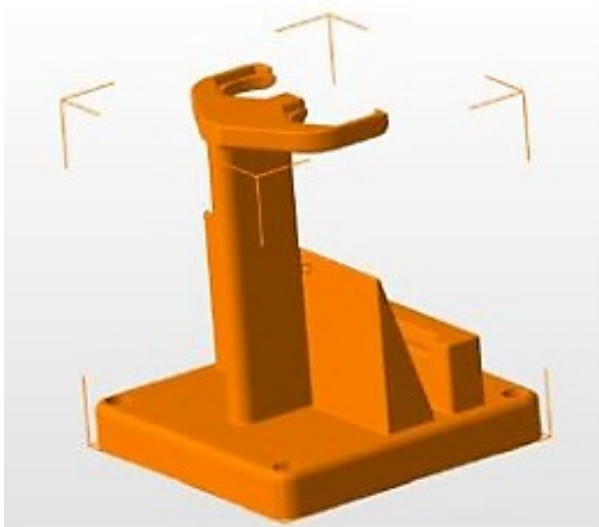
O – Originální přípravek zhotovený konvenčním obráběním

1 až 5 – Přípravky vytisknuté ve firmě SIEMENS

4 Kvalitativní zhodnocení řešeného závěru

4.1 Výrobní náklady

V níže uvedených tabulkách můžeme vidět časovou náročnost a spotřebované množství materiálu na tisk přípravků. Jsou zde také uvedeny finanční náklady k jejich tisku. Finanční úspora činí zhruba 55 500,- Kč.



Obrázek 30 – Model tisknutého přípravku

Tabulka 9 – Výrobní náklady tištěného přípravku

Číslo objednávky	19/1195 (23.10.2019); OPW
Cílový počet kusů	14
Výrobní čas	56 hodin
Spotřebovaný materiál	CB PA 12
	74,62 ml- bright fusing agent
	438,62 ml- fusing agent
	340,62 ml- detailing agent
	12 880 g- powder CB PA 12
Cena 1 kusu	224,95 € (6 348,88,- Kč)
Cena 14 kusů	3149,3 € (88 884,32,- Kč)



Obrázek 31 – Originální přípravek z kovu

Tabulka 10 – Výrobní náklady kovového přípravku

Číslo objednávky	19/759 (19.6.2019); OPW
Cílový počet kusů	14
Výrobní čas	140 hodin
Spotřebovaný materiál	Steel
Cena 1 kusu	377,25 € (10 308,5,- Kč)
Cena 14 kusů	5281,5 € (144 319,- Kč)

Diskuze a závěr

Cílem předložené bakalářské práce bylo porovnání vytištěných přípravků a zjištění jejich odchylek. Do vyhodnocení bylo zařazeno patnáct vytištěných přípravků. Z celkového počtu patnácti byl jeden vytisknut externí firmou. Pro rozšíření tohoto experimentu se do porovnání zařadil i jeden vyrobený konvenčním obráběním.

Z hlediska výsledků vyhodnocování můžeme konstatovat, že přípravky vytištěné podstavou směrem dolů dosahovaly ve většině případů lepších výsledků než ty tisknuté podstavou vzhůru. Tento fakt bylo možné vidět u vyhodnocení odchylek jednotlivých kusů. Co se týkalo přípravku vytisknutého externí firmou, tak byl poměrně dobře vytisknut až na jeho spodní část, kde se rozměry ve více místech pohybovaly výrazně pod hranicí minimální tolerance. Při vyhodnocení odchylek originálního kusu vyrobeného konvenčním obráběním bylo možné vidět, že odchylky jsou zcela minimální. K jeho hodnotám se však přiblížily ty přípravky, které byly vytisknuty podstavou směrem dolů, konkrétně tedy 1B, 2C, 4C, 5C. Všechny tyto přípravky dosahovaly takřka totožných odchylek a lze je považovat za nejlépe vytištěné. Mimo těchto byly mezi nimi také další, jejichž odchylky byly porovnatelné s originálním přípravkem, avšak se u nich vyskytovala určitá část, která nesplňovala požadavky kladené na námi zadanou toleranci. Jednalo se především o jejich horní, spodní, popřípadě boční část, pokaždé jedna z těchto částí nevyhovovala. Nejhůře dopadl tisk kusů orientovaných podstavou směrem vzhůru, jelikož jejich hodnoty nedosahovaly na měřených místech požadované tolerance.

Co se týče ekonomického zhodnocení, tak dle přiložených tabulek lze vidět výrazná finanční a časová úspora. Výrobní čas pro vyrobení originálního přípravku činí 140 hodin. Celkové výrobní náklady pak činí 144 319,- Kč. Oproti konvenčnímu obrábění, vytisknutí čtrnácti přípravků trvalo 56 hodin. Přípravky byly v zástavbové komoře tisknuty po třech kusech. Celkové výrobní náklady, v kterých je zahrnut spotřební materiál vychází na částku zhruba 89 000,- Kč. Z těchto výsledných částek můžeme vidět, že celková finanční úspora činí zhruba 55 500,- Kč a co se týče výrobního času, tak potom 84 hodin. Z těchto dosažených výsledků vyplývá, že tisk přípravků se jeví dobrým řešením z hlediska výrobních nákladů. Avšak je stále třeba co zlepšovat z hlediska rozměrové přesnosti a minimalizovat tak vzniklé odchylky. Přesto se podařilo vytisknout čtyři takřka totožné přípravky, které rozměrově odpovídaly originálnímu přípravku.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Jiřímu Hajnyšovi, Ph.D., vedoucímu mé bakalářské práce, za vedení, připomínky a čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům firmy SIEMENS Mohelnice. Především Ing. Michalu Průšovi, který mi pomáhal svými připomínkami, radami i náměty při obtížích nebo otázkách, na které jsem při práci narazil, a především za jeho čas, který mi věnoval na konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Davidu Piškovi za možnost využití měřicího zařízení a za veškerou pomoc s tím související.

Seznam použité literatury

- [1] 3D tisk. 3D-tisk: aditivní výroba & rapid prototyping [online]. Vydavatelství Nová Média, c2014 [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/3d-tisk/>
- [2] PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. Základy 3D tisku [online]. 2014 [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3dtisku.pdf>
- [3] 3D tisk. 3D-tisk: aditivní výroba & rapid prototyping [online]. Vydavatelství Nová Média, c2014 [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/aditivni-vyroba/>
- [4] 3D tisk. 3D-tisk: aditivní výroba & rapid prototyping [online]. Vydavatelství Nová Média, c2014 [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/wiki/aditivni-vyroba/>
- [5] What is Additive Manufacturing? [online]. Německo [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>
- [6] 3D tisk. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk
- [7] Materiál pro 3D. <https://www.materialpro3d.cz>. [online]. [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>
- [8] Simplify 3D. <https://www.simplify3d.com>. [online]. [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/wp-content/uploads/2016/07/3D-Printer-Beside-SoftwareMonitor.jpg>.
- [9] S. S. D. D. T. Pham, „Rapid manufacturing, Springer-Verlag,“ 2001.
- [10] Technologie 3D tisku [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/hardware-pc/3d-tisk/technologie-3d-tisk>
- [11] I. Gibson, Additive Manufacturing Technologies, New York: Springer, 2010.
- [12] Domácí využití 3D tiskárny [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.originalnitonery.cz/blog/domaci-vyuziti-3d-tiskarny>
- [13] Historie a budoucnost 3D tisku [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://gyarabska.cz/1bs1/benesovam/>

- [14] Rychlá stavba [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: https://tn.nova.cz/clanek/staci-deset-tisic-dolaru-a-za-jeden-den-muzete-mit-dum-z-3d-tiskarny.html#pg_image_number
- [15] HP: Rok 2020 bude rokem 3D tisku [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://channelworld.cz/analyzy/hp-rok-2020-bude-rokem-3d-tisku-23823>
- [16] Přehled technologií 3D tisku [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
- [17] Inventor blog. <https://www.inventor3dblog.cz>. [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/3d-tisk-technologie/>.
- [18] Easy cnc. <https://www.easycnc.cz>. [online] [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiech-3d-tisku/>.
- [19] What is Stereolithography? [online]. 3D Systems, c2017 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/node/53381>
- [20] 3D tisk – metody. [online]. 2013 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/>
- [21] Types of 3D printers.. [online]. 3D Printing from scratch, c2017 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printingtechnologies-overview/>
- [22] Selective Laser Sintering. 3D-tisk [online]. Vydavatelství Nová média, c2014 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
- [23] Rychlá výroba prototypů. F1NEWS [online]. Září 2013. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://f1news.autoroad.cz/technika/45427-rychla-vyroba-prototypuklic-k-intenzivnim-aerodynamickym-programum-v-f1-video>
- [24] 3D tisk. <https://www.3d-tisk.cz>. [online] [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.3dtisk.cz/fused-deposition-modeling/>.
- [25] Multi Jet Fusion [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/multi-jet-fusion>

- [26] 3D tiskárna HP Jet Fusion 540 [online]. [cit. 2020-03-08].
Dostupné z: <http://h10032.www1.hp.com/ctg/Manual/c06361362>
- [27] MJF (Multi Jet Fusion) [online]. [cit. 2020-03-18].
Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/138/mjf-multi-jet-fusion>
- [28] PreciSCAN H301, H331 a H771 [online]. [cit. 2020-03-18].
Dostupné z: <https://www.merici-pristroje.cz/preciscan-rady-h-rucni-skener/>
- [29] PreciSCAN X335 a X775 [online]. [cit. 2020-03-18].
Dostupné z: <https://www.merici-pristroje.cz/3d-scanner-preciscan-rady-x/>
- [30] Mechanické vlastnosti materiálů pro 3D tisk [online]. [cit. 2020-04-12].
Dostupné z: <https://www.lke.cz/cz/mechanicke-vlastnosti-materialu-pro-3d-tisk/>
- [31] Průvodce materiály [online]. [cit. 2020-04-12].
Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [32] Přehled materiálů pro 3D tisk [online]. [cit. 2020-04-12].
Dostupné z: <https://mk-eshop.cz/blog/post/8-prehled-materialu-pro-3d-tisk#PLA>
- [33] Materiály pro 3D tisk [online]. [cit. 2020-04-12].
Dostupné z: <https://for3dtisk.cz/materialy-pro-3d-tisk/>
- [34] ABS. Trider [online]. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://trider.cz/material/abs>
- [35] BALOTINA. PKIT Praha, s.r.o. [online]. [cit. 2020-05-08].
Dostupné z: <https://www.pkit.cz/cs/balotina/>